



Aalto-yliopisto  
Insinöörیتieteiden  
korkeakoulu

Eeva Rinta

## **Liikennemallien käyttö joukkoliikenteen aikataulusuunnittelussa**

Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi  
diplomi-insinöörin tutkintoa varten.

Espoossa 8.9.2014

Valvoja: Professori Tapio Luttinen

Ohjaaja: DI Mervi Vatanen

---

**Tekijä** Eeva Rinta

---

**Työn nimi** Liikennemallien käyttö joukkoliikenteen aikataulusuunnittelussa

---

**Laitos** Yhdyskunta- ja ympäristötekniikka

---

**Professuuri** Liikennetekniikka

---

**Professuurikoodi** Yhd-71

---

**Työn valvoja** Prof. Tapio Luttinen

---

**Työn ohjaaja(t)** DI Mervi Vatanen, HSL

---

**Päivämäärä** 08.09.2014

**Sivumäärä** 86+11

**Kieli** suomi

---

### Tiivistelmä

Työn tarkoituksena oli tutkia liikennemallien soveltuvuutta aikataulusuunnittelun apuvälineeksi, jotta Helsingin seudun liikenteen joukkoliikennesuunnitteluun saataisiin tehokkaampia työkaluja aikataulujen synkronointiin. Synkronointi on joukkoliikenteen aikataulusuunnittelun haastavin tehtävä, ja sitä parantamalla voidaan lyhentää matka-aikoja joukkoliikenteessä.

Tässä työssä tutkittiin, millaisia työkaluja ja menetelmiä aikataulujen suunnitteluun on käytettävissä. Näitä selvitettiin kirjallisuustutkimuksella sekä tekemällä kyselytutkimus eurooppalaisille joukkoliikenneviranomaisille. Pääpaino työssä oli liikennemallien tutkimuksella, joiden ominaisuuksia selvitettiin kirjallisuuden avulla sekä haastattelulla. Työn empiirisessä osuudessa sijoiteltiin kuusi erilaista joukkoliikennematkaa Emmen aikataulusijoittelualgoritmilla, ja vertailtiin saatuja tuloksia matka-aikakomponentteittain Reittioppaan antamiin tuloksiin. Lisäksi tarkasteltiin aikataulumuutosten, kysyntämuutosten, ajoaikojen sekä sallitun etuajan ja myöhästymisen vaikutuksia matka-aikasummaan ja sen komponentteihin testialueella Itä-Helsingissä. Mallitarkasteluissa käytettiin HSL:n HELMET-liikennemallia.

Työssä havaittiin, että aikataulusijoittelumallilla saatavat matka-ajat poikkesivat jonkin verran Reittioppaan antamista ajoista. Selkein ero suunniteltuihin aikatauluihin nähden havaittiin ajoajoissa, joita mallin havaittiin aliarvioivan. Tutkituilla matkoilla ajoaika muodosti suurimman osan kokonaismatka-ajasta, minkä vuoksi ajoajat vaikuttivat merkittävimmin kokonaismatka-aikojen eroihin. Ajoajat vaikuttivat myös mallin valitsemiin reittivaihtoehtoihin. Tämän vuoksi ajoajat on syytä koodata malliin tarkasti ennen aikataulusijoittelumallin laajempaa hyödyntämistä.

Aluetason testeissä havaittiin, että yksittäisten linjojen aikataulumuutokset muuttavat matka-aikasummaa. Mallin ajoaikoja käytettäessä matka-aikasummassa havaittiin myös vaihtelua, joka vaikutti vastaavan tutkittavien linjojen vuorovälejä ja metron liityntälinjalla 84 myös metron vuoroväliä. Suunniteltuja ajoaikoja käytettäessä matka-aikasumma kasvoi huomattavasti ajoaikojen pidentyessä, ja havaittiin siirtymää toisille linjoille, joiden ajoajat säilyivät ennallaan. Lähtöajan jouston kasvattamisen havaittiin pienentävän matka-aikasummaa, sillä matkustajat saattoivat minimoida matkavastusta valitsemalla nopeampia reittejä. Eri kysyntämallit muuttivat testeissä matka-aikasummaa melko vähän.

Aikataulusijoittelumalli sisältää matkan eri osavaiheet, ja näiden havaittiin testeissä käyttäytyvän loogisesti. Tämän perusteella liikennemallien käyttöä voisi kokeilla aikataulusuunnittelun apuvälineenä ja pyrkiä validoimaan näissä testeissä saadut tulokset myös todellisissa tilanteissa. Mikäli menetelmän toimivuus voidaan osoittaa myös käytännön tarkasteluissa, sitä voisi soveltaa etenkin monimutkaisemmissa järjestelmissä, missä on useita linjoja, joilla on useita vaihtopaikkoja.

---

**Avainsanat** aikataulusijoittelu, aikataulusuunnittelu, joukkoliikenne, synkronointi

---



<b>Author</b> Eeva Rinta		
<b>Title of thesis</b> Transit scheduling using traffic models		
<b>Department</b> Transportation and Environmental Engineering		
<b>Professorship</b> Transportation Engineering		<b>Code of professorship</b> Yhd-71
<b>Thesis supervisor</b> Prof. Tapio Luttinen		
<b>Thesis advisor(s) / Thesis examiner(s)</b> M.Sc. Mervi Vatanen		
<b>Date</b> 08.09.2014	<b>Number of pages</b> 86+11	<b>Language</b> Finnish

### **Abstract**

The purpose of this study was to investigate the use of transit models in timetable planning to find more efficient tools for timetable synchronization at Helsinki Region Transport (HSL). Timetable synchronization is considered the most difficult task for transit planners, but improved synchronization can decrease transit travel times.

This thesis studied different tools and methods for timetable planning. The study was conducted through literature research and a questionnaire study directed at European transit authorities. The study mainly focused on transit models, which were studied based on literature and an interview. The study also included tests conducted using HSL's HELMET model in Emme. Six different transit trips were assigned using the deterministic transit assignment procedure and the results were compared with planned schedules using the HSL Route Planner (Reittioapas). The effects of changes in timetables, demand, run times and maximum earliness and lateness on total travel time and different travel time components were also studied using a small test region in eastern Helsinki.

The tests indicated that the travel times obtained using the deterministic assignment differed from the planned ones in Reittioapas. In-vehicle times differed most from planned schedules, and seemed to be too short in the deterministic assignment. In-vehicle times made up most of the total travel time of the studied trips, which is why they also had the greatest impact on differences in total travel times. Run times also influenced the routes chosen by the model. Therefore exact transit run times should be input into the model before wider use.

Studies conducted using the test region showed that the total travel time changes when timetables for a single transit line are changed. When using run times calculated by the model there was variation in the total travel times that seemed to correspond with the headways of the studied transit lines, and travel times of the metro feeder line 84 also showed variation corresponding to the headway of the metro. When using planned run times the total travel time increased as the run times increased, and some trips shifted to other transit lines whose run times remained unchanged. Increasing the maximum earliness and lateness of trips decreased the total travel time because passengers were able to minimize travel times by choosing faster routes. Changing the distribution of demand had quite a small impact on total travel times.

The deterministic transit assignment includes the different transit trip components, and their changes seemed logical in the tests conducted. Therefore transit models could be further tested and validated using this real data to determine whether the results obtained in this thesis study could be replicated. If the method continues to give realistic results, it could be applied especially to more complex transit networks with multiple transit lines with several transfer points.

**Keywords** deterministic transit assignment, scheduling, synchronization, transit

## **Alkusanat**

Tämä diplomityö on tehty Helsingin seudun liikenne –kuntayhtymälle (HSL), jossa työn ohjaajana on toiminut Mervi Vatanen. Työn valvojana on toiminut professori Tapio Luttinen.

Haluan kiittää HSL:ää mahdollisuudesta tarttua tähän haastavaan ja mielenkiintoiseen aiheeseen. Kiitokset myös ohjaajalleni Mervi Vataselle kärsivällisestä ja kannustavasta ohjauksesta työn eri vaiheissa sekä perehdyttämisestä Emmen saloihin. Lisäksi kiitos kuuluu muille kollegoilleni HSL:ssä kaikista ideoista, avusta ja tsemppauksesta. Kiitän myös työn valvojaa professori Tapio Luttista sekä haastateltuja asiantuntijoita.

Lisäksi haluan kiittää perhettäni ja ystäviäni opintoihin saamastani kannustuksesta. Erityiskiitokset ansaitsee rakas Eero, jonka tuki on ollut korvaamatonta tämän välillä loputtomalta tuntuneen prosessin aikana.

Espoo 8.9.2014

Eeva Rinta

# Sisällysluettelo

Tiivistelmä

Abstract

Alkusanat

Sisällysluettelo .....	1
Käsitteet ja lyhenteet .....	3
1 Johdanto .....	5
1.1 Tutkimuksen taustaa .....	5
1.2 Tutkimuksen tavoite .....	5
1.3 Tutkimuksen rajaukset .....	6
2 Joukkoliikenteen aikataulusuunnittelu .....	7
2.1 Joukkoliikenteen suunnittelu .....	7
2.2 Aikataulusuunnittelun lähtökohdat ja tavoitteet .....	9
2.3 Aikataulusuunnittelun matemaattisia ratkaisuja .....	12
3 Liikennemallit .....	14
3.1 Yleistä .....	14
3.2 Neliporrasmalli .....	14
3.3 Liikenteen sijoittelu .....	16
3.4 Malliohjelmat .....	18
3.4.1 Emme .....	18
3.4.2 Visum .....	23
3.4.3 Muita makromalleja .....	25
3.5 Muita vaihtoehtoja .....	25
4 Joukkoliikenteen suunnittelu HSL-alueella .....	28
4.1 Joukkoliikenteen suunnittelu .....	28
4.2 Aikataulujen suunnittelu .....	29
4.3 HSL:n HELMET-malli .....	31
5 Tutkimusmenetelmät ja käytetty aineisto .....	34
5.1 Kyselytutkimus .....	34
5.2 Haastattelututkimus .....	34
5.3 Liikennemallitutkimus .....	35
5.3.1 Lähtöaineisto .....	35
5.3.2 Ajoaikojen tarkentaminen .....	36

5.3.3	Sijoitteluparametrit.....	37
6	Kysely- ja haastattelututkimukset .....	39
6.1	Aikataulujen suunnittelu muissa kaupungeissa .....	39
6.2	Aikataulusijoittelu Visum-ohjelmalla .....	40
7	Yksittäisten yhteysvälien testit.....	42
7.1	Tarjotut yhteydet .....	42
7.2	Reitin kokonaismatka-aika .....	43
7.3	Kävelyaika.....	44
7.4	Vaihto aika .....	47
7.5	Ajo aika .....	49
7.6	Ajoajan muodostuminen.....	52
7.7	Ajoaikojen tarkentamisen vaikutukset mallin tarjoamiin reitteihin .....	55
7.8	Havaintoja .....	56
8	Aluetason testit.....	58
8.1	Aikataulumuutosten vaikutus matka-aikasummaan .....	58
8.2	Aikataulumuutosten vaikutus eri matka-aikakomponentteihin .....	60
8.3	Aikataulumuutosten vaikutus nousumääriin .....	62
8.4	Ajoaikojen vaikutus tuloksiin.....	63
8.5	Kysyntämuutosten vaikutus tuloksiin .....	67
8.6	Sallitun etuajan ja myöhästymisen vaikutus tuloksiin .....	72
8.7	Tulosten luotettavuus .....	76
9	Johtopäätökset.....	77
9.1	Yhteenveto.....	77
9.2	Päätelmät .....	79
9.3	Jatkotutkimuskohteita.....	80
	Lähteet.....	82
	Liiteluettelo .....	86
	Liitteet	

## Käsitteet ja lyhenteet

**Ajantasauspysäkki** on pysäkki, jolle on määritelty aika, jota ennen bussi tai vaunu ei ohita pysäkkiä, eli ajantasausaika. (HSL 2012)

**Ajoaika** on matkustajan kulkuneuvossa viettämä aika. Siihen sisältyvät kulkuneuvon nousu, ajo ja pysähdykset sekä kulkuvälineestä poistuminen. (Ojala ja Pursula 1994)

**Autokierro** (block) sisältää yhden ajoneuvon ajamat lähdöt ja siirtoajat sekä valmisteluajan. Samaan autokierroon voi kuulua useita eri linjoja. (HSL 2012)

**Elpymisaika** (layover) tarvitaan jokaisen lähdön lopussa ennen seuraavaa lähtöaikaa. Elpymisajalla varmistetaan, että ajoaikojen hajonnasta johtuva myöhästyminen ei siirry seuraavalle lähdölle. (Black 1995) HSL-liikenteessä elpymisaika suunnitellaan persenttiin 95 mukaan.

**Emme** on Montrealin yliopiston liikennetutkimusryhmässä kehitetty liikennemalliohjelma, jota kehittää nykyään INRO. (INRO 2013) Emme on yleisin Suomessa käytetty liikenteen sijoitteluohjelma. (Särkkä 2013)

**Liikenne-ennustemallin** (kutsutaan usein myös ennustemalliksi tai liikennemalliksi) avulla muodostetaan maankäyttö- ja väestötiedoista liikennemääräennusteita. Yleensä liikenne-ennusteet tehdään neliporrasmallin avulla, jonka vaiheet ovat matkatuotokset, matkojen suuntautuminen, kulkutavan valinta sekä liikenneverkkojen kuormitus (ks. tarkemmin sijoittelu). (RIL 2005)

**Hastus** on kanadalaisen GIRO:n kehittämä aikataulusuunnitteluohjelmisto. HSL:ssä käytetään Hastuksen ATP-moduulia ajoaikojen suunnitteluun sekä Vehicle-moduulia aikataulujen eli kaavioiden suunnitteluun. (Räty 2013)

**HELMET-malli** on vuoden 2010 Helsingin seudun työssäkäyntialueen liikenne-ennustejärjestelmän henkilöliikenteen kysyntämalli. (Elo lähte et al. 2011)

**Jakoluku** on suhdeluku, jolla suuren osa-alueen tieto voidaan jakaa sen pienemmille osa-alueille tai kahden suuralueen väliset matkat voidaan jakaa osa-alueiden välisiksi matkoiksi. Jakoluku lasketaan usein asukas- ja työpaikkamäärien suhteiden perusteella. (Elo lähte et al. 2011)

**JORE eli Joukkoliikennerekisteri** on alun perin YTV:n käyttöön ottama järjestelmä, joka pitää sisällään tiedot mm. joukkoliikenteen reiteistä, pysäkeistä sekä aikatauluista. Tietokannasta poimitaan lähtödata mm. Reittiopasta ja muita infojärjestelmiä, pysäkki-aikatauluja sekä liikennöintikorvausten laskentaa varten. (Kangas 2013)

**Kaavio** sisältää lähdöt ja niistä muodostetut autokierrot yhdelle tai useammalle linjalle. Kaaviolla on tietty päivätyyppi ja voimassaoloaika sekä kohdetunnus. Kohdetunnuksen perusteella kaavio kohdistetaan tiettyyn sopimuskohteeseen. Sopimuskohteeseen voi kuulua useita kaavioita. Liikennöintikorvaukset maksetaan kaavioiden perusteella. (HSL 2012)

**Kierrosaika** on yhden ajoneuvon tarvitsema aika linjan kahden peräkkäisen lähtöajan välillä samasta päätepisteestä. Se sisältää molempien reitinsuuntien ajoajat ja elpymisajat. (Vuchic 2005)

**Kysyntämatriisi** on liikennemallissa käytettävä taulukkomuotoinen kuvaus eri lähtö- ja määräpaikkojen välisistä matkamääristä tietyllä kulkumuodolla (esim. ajoneuvoliikenne ja joukkoliikenne). (Elolähde et al. 2011)

**Linjatiedosto** (transit line table) on Emme-liikennemallissa käytettävä kuvaus joukkoliikenteen tarjonnasta. Se sisältää tiedot mm. linjojen reiteistä ja pysäkeistä, vuoroväleistä sekä ajoaikojen laskentamenetelmästä. (INRO 2013)

**Linkki** on liikenneverkon mallintamisessa käytettävä käsite, joka kuvaa kahden solmun välistä tieyhteyttä. Linkillä on erilaisia ominaisuustietoja, kuten pituus ja kulkutapa sekä mahdollisuus tallentaa myös käyttäjäkohtaisia tietoja. (Elolähde et al. 2011)

**Matka-aikakomponentteja** ovat matkan eri osavaiheet eli odottelu-, kävely-, odotus-, vaihto- sekä ajoajat. (Ojala ja Pursula 1994)

**Matkavastus** eli yleistetty matka-aika on painotettu summa eri matka-aikakomponenteista. Matkavastus huomioi mm. matkustajien vaihdon yhteydessä kokeman epämukavuuden, ja matkan eri vaiheita voi painottaa eri kertoimilla. (Ojala ja Pursula 1994)

**Nousuvastus** (boarding time) kuvaa jokaiseen joukkoliikennenuosuun liittyvää vastusta, joka lasketaan osaksi kokonaismatkavastusta. HELMET-mallissa nousuvastus riippuu kulkumuodosta. Bussien nousuvastus riippuu linjan pituudesta ja muiden joukkoliikennemuotojen nousuvastus on 1. (Elolähde et al. 2011)

**Palvelutaso** kuvaa joukkoliikenteen laatua, ja siihen vaikuttavat mm. liikennöintiajat, vuorovälit sekä etäisyydet pysäkeille. (Räty et al. 2012)

**Porrastaminen** (myös tasavälistäminen) tarkoittaa samaa reittiosuutta kulkevien linjojen aikataulujen yhteensovittamista tasaisemman ja lyhyemmän yhteisen vuorovälin saavuttamiseksi. Porrastaminen on mahdollista, mikäli linjojen vuorovälit ovat samat tai toistensa kerrannaiset. Esimerkiksi kahdella 30 minuutin vuorovälin linjalla voidaan porrastamalla saada yhteiselle osuudelle tasainen 15 minuutin vuoroväli. (Helke ja Kantola 2009)

**Sentroidi** (centroid) on liikennemallin solmu, joka kuvaa liikenteen lähtö- tai määräpaikkaa. (Elolähde et al. 2011)

**Sijoittelu** (assignment) tarkoittaa liikenneverkon mallin (tieverkko, joukkoliikennelinjat) kuormittamista kysyntämatriisilla (matkamäärät osa-alueilta toisille). Sijoittelutulosina saadaan väylien liikennemäärät, joukkoliikennelinjojen matkustajamäärät sekä alueiden väliset vastukset, kuten matka-ajat. (Elolähde et al. 2011)

**Skenaario** (scenario) on liikennemallissa yksi tarjontavaihtoehto. Esimerkiksi tulevia linjastoratkaisuja suunniteltaessa voidaan muodostaa useita skenaarioita, joissa linjasto on hieman erilainen, ja vertailla näitä vaihtoehtoja. (PTV 2012, s. 18)

**Solmu** (node) on liikennemallin pistemäinen olio, joka voi kuvata mm. risteyskää, pysäkkejä sekä liikenteen lähtö- ja määräpaikkoja. Solmuja yhdistävät linkit. (Elolähde et al. 2011)

**Visum** on saksalaisen PTV Groupin kehittämä liikennemalliohjelma, johon kuuluu työkaluja myös mm. liikennöinnin ja autokiertojen suunnitteluun. (PTV 2013)

**Vuoroväli** on aika, joka kuluu linjan kahden perättäisen lähdön ohitusaikojen välillä tarkastelupisteessä. (Vuchic 2005)



# 1 Johdanto

## 1.1 Tutkimuksen taustaa

Joukkoliikennematkustajan ensisijaisena tavoitteena on päästä määränpäähänsä mahdollisimman sujuvasti. Joukkoliikenteellä onkin käyttäjilleen yleensä lähinnä välinearvoa liikkumisen mahdollistajana. Liikenteen järjestäjälle puolestaan on tärkeää, että liikennöinti on taloudellista, eli tarvittava palvelutaso pyritään tuottamaan mahdollisimman pienin kokonaiskustannuksin. Joukkoliikenteen suunnittelussa joudutaan tasapainottelemaan näiden ristiriitaisten vaatimuksien välillä.

Suuri osa joukkoliikennesuunnittelun kysymyksistä, kuten linjasto ja perusvuorovälit, ratkaistaan jo ennen varsinaista aikataulujen suunnittelua. Aikataulusuunnittelun osatekijöillä, kuten aikataulujen porrastamisella sekä vaihtojen yhteensovittamisella, on kuitenkin myös tärkeä merkitys matkustajan kokeman palvelun kannalta, sillä niillä voidaan vähentää matkustajan liikkumiseen kuluva-aikaa.

Vuonna 2012 pääkaupunkiseudun asukkaiden joukkoliikennematkoista pääkaupunkiseudun sisällä 27,6 prosenttiin sisältyi vähintään yksi vaihto (HSL 2013a). Vaihdollisten matkojen määrän ennakoita kasvavan tulevaisuudessa, kun mm. Kehärata ja Länsimetro valmistuvat, jolloin monilla uusilla alueilla siirrytään liityntäliikenteeseen. Kaikki sellaiset joukkoliikennejärjestelmät, joiden liikennöintialue ja -aika ovat laajoja, perustuvat vaihtoihin linjojen ja liikennemuotojen välillä. Vaihtojen sujuminen on tärkeää, jotta joukkoliikenne olisi houkuttelevaa nykyisille ja uusille matkustajille. (Vuchic 2005) Terzisin ja Lastin (2000) keräämä data antaa myös viitteitä siitä, että vaihtojen suurempi määrä liittyy korkeampaan joukkoliikenteen kulkumuoto-osuuteen.

Cederin et al. (2001) mukaan aikataulujen synkronointi on joukkoliikenteen aikataulusuunnittelun haastavin tehtävä, minkä vuoksi suunnittelun tueksi etsitään edelleen uusia työkaluja. Liikennemalleilla voidaan sijoitella tunnettu tai ennustettu kysyntä liikenneverkolle, jolloin lopputuloksena saadaan mm. nousijamäärät linjoittain sekä tietoa matka-ajoista ja matkan osavaiheiden kestoista, kuten vaihtoajoista. Tekemällä sijoittelu useammalle erilaiselle aikataululle voidaan vertailla, miten hyvin eri vaihtoehdot toteuttavat aikatauluille asetettuja tavoitteita. Tavoitteena on usein minimoida liikenteessä käytettyä kokonaismatka-aikaa.

HSL:ssä aikataulusuunnittelua on aiemmin tutkinut Sara Lukkarinen (2012), joka selvitti diplomityössään optimaalisen ajoajan määrittelyä aikataulusuunnittelussa. Lisäksi HSL:n edeltäjäorganisaatiossa HKL:ssä aihetta on sivuttu työssä Vakiominuuttiaikataulumallin soveltaminen HKL:n bussi- ja raitiotielinjastolla (Helke ja Kantola 2009). Liikennemalleja puolestaan on tutkittu Suomessa muutamissa aiemmissa diplomitoissa. Muun muassa Petja Partanen (2000) tutki yleisemmin Emmen aikataulusijoittelun ominaisuuksia ja Taina Haapamäki (2010) on tutkinut joukkoliikenteen kuvaustapoja Emmessä.

## 1.2 Tutkimuksen tavoite

Tutkimuksen tavoitteena on selvittää, voiko liikennemalleja käyttää HSL:n joukkoliikenteen aikataulusuunnittelun tukena. HSL:llä ei tällä hetkellä ole käytössä kovin tehokkaita työkaluja mm. vaihtojen synkronointiin, vaan tunnetut tärkeät vaihtoyhteydet sovitetaan käsityönä. Tältä diplomityöltä toivotaan apua tähän työvaiheeseen. Diplomityössä selvitettiin haastatteluin myös tarkemmin HSL:n joukkoliikennesuunnittelijoiden

tarpeita ja ideoita, ja näiden haastattelujen avulla tarkennettiin diplomityön tavoitteita. Haastattelujen tuloksia on kuvattu tarkemmin diplomityön luvussa 4.2.

Diplomityössä tutkitaan, millaisia keinoja ja työkaluja aikataulujen suunnitteluun ja arviointiin on olemassa. Työ painottuu pääosin liikennemallien tutkimukseen, jolla selvitetään sijoittelun mahdollisuuksia aikataulujen vertailussa sekä eri malliohjelmien soveltuvuutta aikataulupohjaisiin tarkasteluihin. Työssä selvitetään aikataulupohjaisen sijoittelun ominaisuuksia sekä sen edellyttämiä lähtötietoja ja niiden tuottamista. Mallitarkasteluissa lähtökohtana on minimoida joukkoliikennematkojen matka-aikasummaa. Lisäksi tutkitaan mallin antaman matka-ajan muodostumista komponenteittain. Työssä tutkitaan, kuinka hyvin mallin antamat tulokset vastaavat todellisuutta, sekä miten eri tekijät vaikuttavat mallituloksiin. Näiden perusteella on tarkoitus määritellä, miten malleja voi soveltaa käytännön suunnittelutyössä, sekä laatia suosituksia myöhempää käyttöä varten.

Työn alussa käsitellään kirjallisuuden pohjalta joukkoliikennesuunnittelun ja aikataulusuunnittelun teoreettista taustaa. Luvussa 3 käsitellään yleisesti liikenteen mallintamista ja tarkemmin liikenteen sijoittelua malleilla, sekä esitellään erilaisia malliohjelmia ja muita työkaluja liikennejärjestelmän arviointiin. Lisäksi kuvataan suunnittelukäytäntöjä HSL:stä ja valituista vertailukaupungeista. Kokeellisessa osassa esitellään ensin käytetyt tutkimusmenetelmät ja tarkasteluissa käytetty aineisto, ja sitten testisijoitteluihin saadut tulokset. Lopuksi selostetaan työssä tehdyt johtopäätökset sekä ehdotukset jatkotoimenpiteiksi.

### **1.3 Tutkimuksen rajaukset**

HSL:ssä on aiemmin määritetty suunnitteluperiaatteet joukkoliikenteen ajoajoille sekä elpymisajoille. Ajoajat suunnitellaan pääosin persentiilin 40 mukaisesti ja päätepysäkkiajat persentiilin 95 mukaan (Lukkarinen 2012). Ajoaikojen suunnitteluun ei siis tässä diplomityössä oteta kantaa, vaan tutkitaan ainoastaan linjojen lähtöaikojen muutoksia.

Liikennemallien osalta työssä keskitytään tutkimaan makrotason malleja, koska tutkimusalue on laaja ja HSL:llä on jo olemassa makrotason malli Emme-järjestelmässä. Ohjelmavertailujen lähtökohdaksi valittiin Emme-ohjelma, sillä valmiiden aineistojen ansiosta tarkastelujen vaatima työmäärä on pienempi ja ohjelman osaamista on valmiiksi saatavilla. Uuden tarkemman tason mallin laatiminen alueelta taas olisi hyvin työlästä.

Malleilla tarkastellaan joukkoliikenteen sijoittelua. Voidaan olettaa, että suhteellisen pienet liikenteen tarjontamuutokset eivät vaikuta merkittävästi liikenteen kysyntään, suuntautumiseen tai kulkutavan valintaan. Sijoitteluvaiheen pitäisi riittää paljastamaan, mikäli tutkittavien vaihtoehtojen välillä on merkittäviä eroja.

Liikennemallitarkastelujen tutkimusalueena käytettiin Laajasaloa ja Itä-Helsinkiä, jotta aikataulupohjaisen mallin vaatimien tarkennusten edellyttämä työmäärä pysyisi kohtuullisena. Lisäksi reittivertailuihin otettiin mukaan viisi muuta yhteysväliä, jotta saataisiin tuloksia erityyppisiltä ja eripituisilta linjoilta. Mallituloksista keskitytään analysoimaan matka-aikojen muutoksia.

## 2 Joukkoliikenteen aikataulusuunnittelu

Tässä luvussa kuvataan joukkoliikennesuunnittelun ja aikataulusuunnittelun perusperiaatteita. Lisäksi esitellään matemaattista lähestymistapaa aikataulusuunnitteluun sekä aiheesta tehtyä tutkimusta.

### 2.1 Joukkoliikenteen suunnittelu

Hyvin toimiva liikennejärjestelmä on merkittävä seudullisen kilpailukyvyyn tekijä, ja joukkoliikenteellä on etenkin suurissa kaupungeissa tärkeä rooli liikennejärjestelmän osana. Joukkoliikenteen käyttöä lisäämällä voidaan paitsi vähentää liikenteen ruuhkautumista ja siten nopeuttaa ja sujuvoittaa liikkumista, myös mm. vähentää päästöjä ja hillitä ilmastonmuutosta, lisätä seudun viihtyisyyttä parantamalla ilmanlaatua ja vähentämällä melua sekä tuoda liikkumismahdollisuuksia myös niille väestöryhmille, joille oman auton käyttö ei ole mahdollista.

Cederin ja Wilsonin (1986) mukaan joukkoliikenteen suunnittelu koostuu taulukon 1 mukaisesti viidestä osavaiheesta: verkon, vuorovälien, aikataulujen, autokiertojen ja työvuorojen suunnittelusta. Nämä osavaiheet eivät ole täysin itsenäisiä, vaan optimaalisen ratkaisun löytämiseksi suunnitteluongelmaa tulisi käsitellä kokonaisuutena. Kuitenkin pelkästään nämä suunnittelun osavaiheet ovat matemaattisesti hyvin monimutkaisia, joten käytännön työssä niitä joudutaan tarkastelemaan peräkkäin.

Taulukko 1. Joukkoliikenteen suunnitteluprosessi (Ceder ja Wilson 1986).

Riippumattomat lähtötiedot	Suunnittelutyövaihe	Lopputulokset
Kysyntädata Tarjontadata Reittien toimivuusindeksit	<u>Taso A</u> Linjaston suunnittelu	Reittimuutokset Uudet reitit Liikennöintistrategiat
Käytettävissä oleva subventio Käytettävissä oleva bussikalusto Palvelukäytännöt Nykyiset matkustajamäärät	<u>Taso B</u> Vuorovälien määrittely	Vuorovälit
Kysyntä vuorokaudenajoittain Ensimmäisten ja viimeisten lähtöjen ajankohta Ajoajat	<u>Taso C</u> Aikataulujen suunnittelu	Vuorojen lähtöajat Vuorojen saapumisajat
Siirtoajojen kestot Elpymisajat Aikataulurajoitteet Kustannusrakenne	<u>Taso D</u> Kalustokiertojen suunnittelu	Kalustokierrot
Kuljettajien työehdot Lähtöjen kustannusrakenne	<u>Taso E</u> Työvuorosuunnittelu	Työvuorot

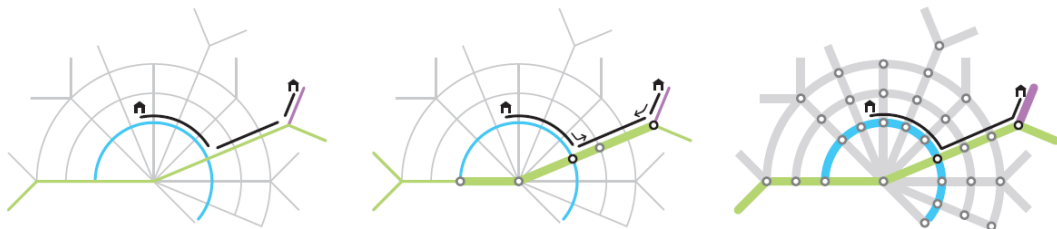
Suunnittelun lähtötietoina käytetään mm. matkustajien palvelutasotoiveita sekä liikenteen järjestämisen tehokkuuspyrkimyksiä, jotka asettavat osin ristiriitaisia vaatimuksia lopputulokselle. Käyttäjät toivovat edullisia, suoria ja tiheitä joukkoliikenneyhteyksiä,

miellyttäviä vaihtamismahdollisuuksia sekä säännöllistä ja luotettavaa liikennöintiä, kun taas liikennöitsijät pyrkivät mahdollisimman tehokkaaseen toimintaan ja voiton maksimointiin. (Guihaire ja Hao 2008) Matkustajien toiveet tiheästä vuorovälistä ovat ristiriidassa liikennöitsijän taloudellisen toiminnan kanssa, sillä operaattorin näkökulmasta on edullisempaa ajaa suuremmalla kalustolla harvemmin saman matkustajamäärän kuljettamiseksi. Joukkoliikennesuunnittelun haasteena onkin sovittaa näitä vaatimuksia toisiinsa. (Vuchic 2005)

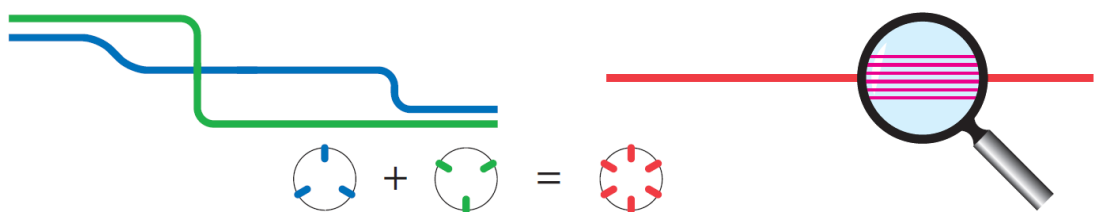
HiTrans (2005b) kokosi kirjallisuudesta tutkimustietoa siitä, mitä joukkoliikenteen ominaisuuksia tarvitaan houkuttelemaan ei-käyttäjiä. Linjasto- ja aikataulusuunnitteluun liittyen tutkimuksissa pidettiin tärkeinä luotettavuutta, vuorotiheyttä sekä reittien kattavuutta. Hieman tai vaihtelevan tärkeitä tekijöitä olivat pysäkkien sijoittelu sekä vaihtoihin liittyvät tekijät. Matka-aikaa sen sijaan ei läpi käytyjen tutkimusten perusteella pidetty erityisen tärkeänä, ja nopeuden vaikutus on laskenut verrattuna vanhempiin tutkimuksiin.

Vaihdollisten joukkoliikennematkojen määrä liittyy voimakkaasti kaupungin tarjoamaan joukkoliikenteen palvelutasoon. Yleensä vähäiset vaihdot kuvaavat joukkoliikennettä, joka tarjoaa lähinnä työmatkayhteyksiä, kun taas laajat liikennöintiajat omaavat, koko seudun kattavat järjestelmät perustuvat vaihdolliseen verkostoon. Puutteelliset vaihtamismahdollisuudet, kuten aikataulujen yhteensopimattomuus, erilaiset lippujärjestelmät sekä suppea matkustajainformaatio, tekevät vaihtamisen turhan haastavaksi ja vähentävät joukkoliikenteen käyttöä. (Vuchic 2005)

Myös HiTrans (2005a) korostaa joukkoliikenteen verkkomaisen rakenteen tärkeyttä joukkoliikenteen houkuttelevuudelle, sillä tiheistä runkolinjoista koostuva verkosto mahdollistaa liikkumisen lähes auton tapaisesti mistä vain, minne vain ja milloin vain, kuten kuvassa 1 havainnollistetaan. Keskittämällä liikennöintiä tietyille runkosuuksille voidaan lisäksi tarjota tiheämpi ja houkuttelevampi vuoroväli samalla automäärällä kuvan 2 mukaisesti.



Kuva 1. Esimerkki linjaston kehittämisestä vahvoihin runkolinjoihin ja sujuviin vaihtopisteisiin perustuen (HiTrans 2005a).



Kuva 2. Esimerkki linjaston keskittämisen vaikutuksesta liikennetarjontaan (HiTrans 2005a).

Joukkoliikenteen liikennöinnin suunnittelussa määritellään vuorovälit, kierrosajat sekä autotarpeet eri linjoille. Vuorovälit mitoitetaan matkustajakysynnän sekä palvelutasotavoitteiden perusteella. Usein ruuhka-ajan vuoroväli määräytyy kysynnän ja hiljaisen ajan vuoroväli tavoitellun palvelutason perusteella. Hiljaisen ajan optimaaliselle vuorovälille  $f_{opt}$  voidaan johtaa yksinkertaistettu lauseke

$$f_{opt} = \sqrt{\frac{pt}{2q}} \quad (1)$$

missä:

$p$  = matkustajamäärä (1/tunti)

$t$  = ajan arvo (€/tunti)

$q$  = bussin operointikustannus tunnissa (€). (Black 1995, s. 196)

Kierrosajat saadaan summaamalla reitin ajamiseen kuluva aika pysähdyksineen, elpymisaika, jolla katetaan ajoaikojen epäluotettavuudesta johtuvaa hajontaa, sekä päätepysäkillä tarvittava siirtymä- ja palveluaika. Myös kuljettajien tauot voidaan joskus laskea mukaan kierrosaikaan. Yksittäisen linjan autotarve saadaan seuraavasti (RIL 2005):

$$\text{Linjan autotarve} = \frac{\text{Kierrosaika}}{\text{Vuoroväli}} \quad (2)$$

Autotarvetta voi olla mahdollista vähentää kierrättämällä autoja linjalta toiselle, mikäli linjoilla on vähintään yksi yhteinen päätepysäkki ja linjat kuuluvat samaan sopimuskohteeseen (Helke ja Kantola 2009). Myöskin jo linjaston suunnittelussa on syytä pyrkiä sellaisiin reitteihin, joiden kierrosaika mahdollistaa tehokkaan liikennöinnin eri vuoroväleillä. Esimerkiksi 60 minuutin kierrosaika on selvästi tehokkaampi erilaisilla vuoroväleillä kuin 65 minuuttia. (RIL 2005)

## 2.2 Aikataulusuunnittelun lähtökohdat ja tavoitteet

Joukkoliikenteen matka-aika jakautuu odottelu-aikaan, kävelyaikoihin, odotus- ja ajoaikaan. Vaihdoissa yhteyksissä matkaan kuuluu lisäksi vaihtokävelyä sekä odotusaikaa vaihtopaikalla. Kävelyaikaa syntyy matkalla lähtöpaikasta pysäkille, pysäkiltä perille sekä mahdollisen vaihdon yhteydessä. (Ojala ja Pursula 1994)

Odotusaika kuvaa ajoneuvon saapumisen odottelua pysäkillä. Tiheillä vuoroväleillä matkustajien saapuminen pysäkille on satunnaista, jolloin keskimääräinen odotusaika on puolet vuorovälistä. Liikenteen epäsäännöllisyys kuitenkin pidentää keskimääräistä odotusaikaa, ja epäsäännöllisen liikenteen odotusajaksi  $w$  saadaan

$$w = \frac{\bar{t}}{2} \left( 1 + \frac{\sigma_t^2}{\bar{t}^2} \right) \quad (3)$$

missä:

$w$  = keskimääräinen odotusaika

$\sigma_t$  = vuorovälien hajonta

$\bar{t}$  = keskimääräinen vuoroväli (Lyly 1978, s. 52).

Vuorovälien kasvaessa matkustajat alkavat seurata aikatauluja, jolloin keskimääräinen odotusaika pienenee ja jää yleensä 8-10 minuuttiin (Lyly 1978). Lyhin odotusaika saa-

vutetaan, kun vuorot saapuvat pysäkille tasaisin väliajoin (Black 1994). Tämän vuoksi eri linjojen aikataulujen porrastaminen yhteisillä reittiosuuksilla on tärkeää.

Ajoaika on ajoneuvossa vietettävää aikaa, joka koetaan keskimäärin samanarvoiseksi sekä linja-autossa että raideliikenteessä, sillä yksilölliset erot preferensseissä kumoavat toisiaan. Ajoaika arvotetaan yleensä painokertoimella yksi. Odotteluaikaa syntyy, mikäli joukkoliikenteen aikataulut eivät sovi täsmälleen matkaa edeltäviin tai seuraaviin toimintoihin. Odotteluaikaa voi syntyä esimerkiksi töistä kotiin lähdettäessä, ja ajan hyödyntämismahdollisuudet riippuvat ajan pituudesta sekä odottelupaikasta. (Ojala ja Pursula 1994)

Matkustajat kokevat kävely-, odotus- ja vaihtoajat selkeästi rasittavammiksi kuin ajoajan, joten näitä tekijöitä kannattaa pyrkiä minimoimaan. Ojala ja Pursula (1994) esittävät myös, että joidenkin tutkimusten mukaan matkan nopeuttaminen sekä kävely- ja odotusaikojen lyhentäminen lisääisi joukkoliikenteen kysyntää enemmän kuin lippujen hintojen lasku. Matkan osavaiheiden rasittavuuskerrointen arvoja on esitetty taulukossa 2. Yleistetty matka-aika  $T_{ij}$  paikasta  $i$  paikkaan  $j$  on yleensä muotoa

$$T_{ij} = \sum_n a_n t_{n_{ij}} + \frac{C_{ij}}{v} - \left( \sum_m b_m s_{m_{ij}} \right) / v \quad (4)$$

missä:

$t_{n_{ij}}$  = matkan osavaiheen  $n$  kesto

$a_n$  = matkan osavaiheen  $n$  rasittavuuskerroin

$C_{ij}$  = keskimääräinen matkakustannus

$v$  = vaunussaolon arvo (= 0,35 \* keskimääräinen bruttopalkka (€/h))

$s_m$  = laatu- ja palvelutekijän  $m$  olemassaolon dummy ( $s_m = 0$  tai  $s_m = 1$ )

$b_m$  = laatu- ja palvelutekijän  $m$  arvo. (Ojala ja Pursula 1994)

*Taulukko 2. Matkavastuskertoimien (rasittavuuskertoimien) tavallisimpia arvoja (Ojala ja Pursula 1994, s. 48).*

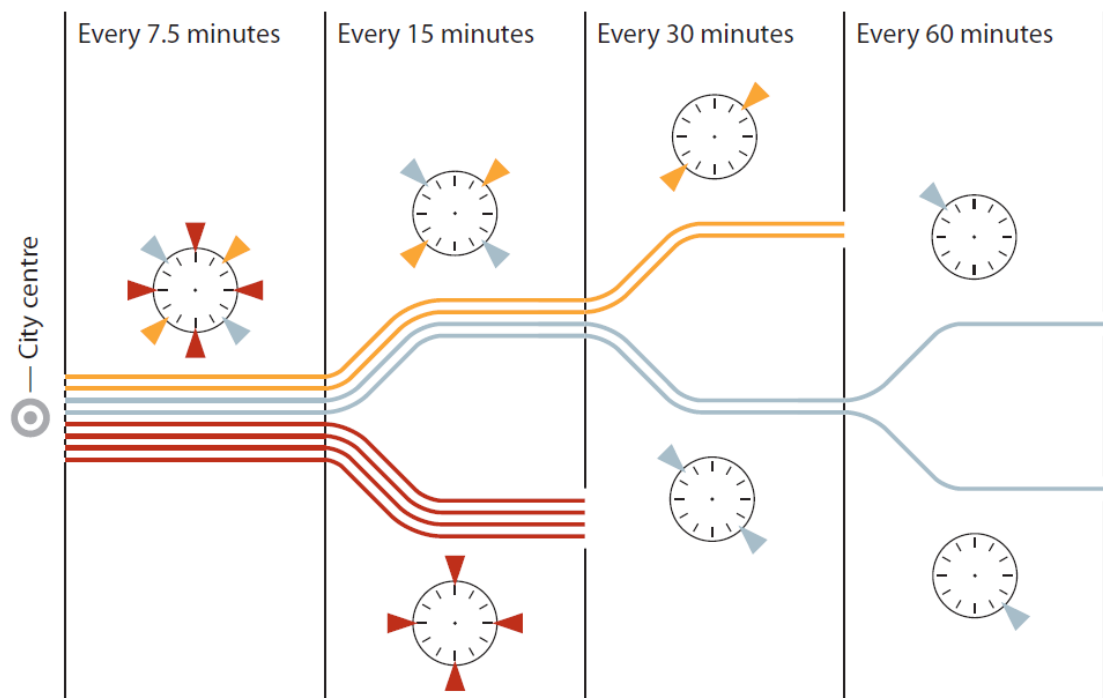
Matka-ajan osavaihe	Rasittavuuskerroin
Odotteluaika	0,0-1,0
Kävelyaika	1,5-2,5
Odotusaika	1,7-3,7
Ajoaika	1
- seisominen väljästi	+ 0,1-0,6
- seisominen tungoksessa	+ 0,2-0,7
Vaihtoaika	2,0-3,5
- järjestetyn vaihdon arvo	+ 3-4 min
- muun vaihdon arvo	+ 5-9 min

Tehokkaalla aikataulusuunnittelulla voidaan vähentää odottelu- ja odotusaikoja, mikäli joukkoliikenteen aikataulut saadaan sopimaan matkustajien liikkumistarpeisiin ja toisten linjojen aikatauluihin.

Matkustajien kannalta selkeät ja symmetriset aikataulut ovat parempia kuin epäsäännölliset lähtöajat (RIL 2005). Aikataulujen asiakasystävällisyyttä voidaan parantaa sillä, että samat lähtöminuutit toistuvat tunneittain muodostaen vakiominuuttisen aikataulun, jonka matkustaja voi muistaa ulkoa (Helke ja Kantola 2009). Toisaalta Ceder (2009)

toteaa, että matkustajainformaation parantuessa tasaisten vakiominuuttiaikataulujen merkitys vähenee.

Guihaire ja Hao (2008) määrittelevät lisäksi, että aikataulut ovat matkustajien kannalta optimaaliset, jos ne tukevat vaihtojen edellytyksiä synkronoinnin sekä erilaisten vaihtoehtojen avulla. Linjojen porrastamisella taas voidaan maksimoida tehollinen vuorotarjonta ja lyhentää vuorovälejä jopa ilman lisäkustannuksia satunnaisilla vuoroväleillä liikennöintiin verrattuna, kun peräkkäin ajaminen vähenee (Helke ja Kantola 2009). Kuvassa 3 on esitetty esimerkki liikennetarjonnan tehostamisesta porrastamisen avulla. Aikataulusuunnittelussa kannattaa huomioida myös autokierrot ja työvuorot, sillä autojen ja työvoiman tarve muodostavat merkittävimmän osan liikennöinnin kustannuksista, ja niillä voidaan siten vaikuttaa liikennöinnin tehokkuuteen (RIL 2005).



Kuva 3. Esimerkki joukkoliikennetarjonnan tehostamisesta aikatauluja porrastamalla (HiTrans 2005a).

Vaihtoaikojen minimoimiseksi aikatauluja voi koordinoida, etenkin jos vuorovälit ovat pitkiä. Lyhyillä vuoroväleillä myöhästymisen sen sijaan pidentää matka-aikaa vain muutamalla minuutilla. Myös matkustajien käyttäytyminen riippuu vuoroväleistä: harvoilla vuoroväleillä matkustajat perehtyvät aikatauluihin ja saapuvat pysäkille vasta lähtöaikaan, kun taas tiheämmillä vuoroväleillä pysäkille saapuminen on satunnaista, jolloin odotusaikaa pysäkillä muodostuu keskimäärin puolet vuorovälistä. Lisäksi ruuhkautuneissa olosuhteissa vaihtojen koordinointi vaihtoaikojen pienentämiseksi saattaa tehdä vaihdoista epävarmempia. (Guihaire ja Hao 2008) Knoppers ja Muller (1995) totesivat myös, että vaihtojen koordinointi kannattaa vain, mikäli syöttölinjan saapumisaikojen keskihajonta vaihtopaikassa on alle 40 % runkojärjestelmän vuorovälistä. Ajoaikojen hajonta muodostaa matkustajille lisäkustannuksen, sillä vaihtelu lisää epävarmuutta matkaan tarvittavasta ajasta sekä bussiin ehtimisestä (Duarte ja Lage 2008).

Myös Liikenne- ja viestintäministeriön tutkimuksessa Joukkoliikenteen kokonaislaatuun vaikuttavat tekijät (Vanhanen et al. 2007) todettiin, että luotettavuus ja aikataulussa pysyminen koetaan tärkeimmäksi laadun osatekijäksi. Tämän vuoksi myös joukkoliikenteen luotettavuuteen tulee panostaa mahdollisimman houkuttelevan joukkoliikennepal-

velun tarjoamiseksi. Optimaalisestikin määritellyt aikataulut kuvaavat vain ennakoitua keskimääräistä tilannetta. Todellisuudessa linjojen ajoajat voivat vaihdella merkittävästi, minkä vuoksi optimaalisetkaan aikataulut eivät aina tuota toivottua lopputulosta.

### **2.3 Aikataulusuunnittelun matemaattisia ratkaisuja**

Aikataulusuunnittelussa muodostetaan joukkoliikennevuorojen lähtö- ja väliajat tunnettujen reittien ja vuorovälien pohjalta. Edellisessä luvussa on kuvattu yleisiä periaatteita hyvien aikataulujen muodostamiseksi. Tässä luvussa puolestaan esitellään matemaattista lähestymistapaa aikataulusuunnitteluongelmaan.

Guihaire ja Hao (2008) määrittelevät, että aikataulusuunnitteluongelmaan kuuluu aikataulujen määrittely kullekin lähdölle ennalta tunnetussa joukkoliikenneverkossa, jonka vuorovälit saattavat olla ennalta määritellyt. Yksittäisen linjan aikataulusuunnittelu on melko helppo tehtävä, mutta ongelma muuttuu huomattavasti monimutkaisemmaksi, mikäli eri linjojen aikatauluja halutaan sovittaa yhteen.

Guihaisen ja Haon (2008) mukaan aikataulujen koordinointi voidaan jakaa järjestettyihin vaihtoihin ja vaihtojen optimointiin. Järjestetyissä vaihdoissa ajoneuvot ajoitetaan saapumaan tärkeisiin vaihtopisteisiin mahdollisimman samaan aikaan, jolloin on mahdollista vaihtaa reittien välillä. Järjestettyjä vaihtoja on helpompi suunnitella ilman teknisiä apuvälineitä, koska suunnittelussa keskitytään muutamaa keskeisimpään vaihtopaikkaan koko verkon sijaan. Tämä lähestymistapa ei kuitenkaan ole kovin tehokas synkronointimenetelmä, sillä alhaisemman prioriteetin vaihtopaikat jäävät usein huomiotta (Currie ja Bromley 2005).

Parhaat tulokset saadaan koko joukkoliikenneverkkoa synkronoimalla, mutta Cederin et al. (2001) mukaan aikataulujen synkronointi on joukkoliikenteen aikataulusuunnittelun haastavin tehtävä. Ibarra-Rojas ja Rios-Solis (2012) osoittavatkin, että aikataulujen synkronointiongelma on NP-vaikea (non-deterministic polynomial-time hard), eli sen täsmälliseksi ratkaisemiseksi ei voida muodostaa tehokasta algoritmia. He kuitenkin esittävät likimääräisen ratkaisun suunnitteluongelmaan.

Aikataulusuunnittelua on tutkittu paljon erilaisilla oletuksilla ja tarkkuustasoilla, ja esimerkiksi Desaulniers ja Hickman (2007) esittelevät tutkimusten kehitystä. Myös Guihaire ja Hao (2008) esittelevät erilaisia matemaattisia, heuristisia ja muita ratkaisumenetelmiä aikataulusuunnitteluongelmaan.

Poorjafari et al. (2014) esittävät, että vaihto-odotus riippuu risteävien linjojen vuoroväleistä, ja että kahden ensimmäisen vuoron välisen vaihtoajan minimoiminen minimoi samalla kaikkien näiden linjojen välillä vaihtavien matkustajien vaihtoajan suunnitteluajanjakson aikana. Poorjafarin et al. (2014) mukaan synkronoinnissa tulee huomioida myös aikataulujen täsmällisyys sekä vaihdon tärkeys, jotka ovat monissa aiemmissa tutkimuksissa jääneet huomiotta.

Poorjafarin et al. (2014) malli perustuu seuraaviin oletuksiin: Linjasto ja pysäkkien sijainti säilyvät muuttumattomina tarkasteluissa, ja linjojen vuorovälit ovat tunnettuja ja vakioita kullakin tarkastelujaksolla. Linjojen ajoajat, pysäkkiajat, vaihtokävelyajat ja vaihtavien matkustajien määrä kullakin pysäkillä ovat tunnettuja ja vakioita. Lisäksi oletetaan, että matkustajat jakautuvat tarkastelujakson aikana tasaisesti kullekin tietyn linjan lähdölle. Näillä oletuksilla saadaan minimoitavaksi lauseke



$$\min Z = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{c=1}^m t f_{ij}^{1c} \cdot P_{ij}^c \cdot I_{ij}^c \cdot f_{ij}^c \quad (5)$$

missä:

$t f_{ij}^{1c}$  = vaihto aika linjojen i ja j ensimmäisten vuorojen välillä vaihtopaikassa c

$P_{ij}^c$  = yhdellä linjan i vuorolla saapuvien linjalta i linjalle j vaihtavien matkustajien lukumäärä paikassa c vaihtojakson aikana

$I_{ij}^c$  = linjojen i ja j välisen vaihdon painokerroin (vaihdon tärkeys)

$f_{ij}^c$  = dummy-muuttuja, joka suodattaa pois mahdottomat vaihdot sellaisten linjojen välillä, jotka eivät risteä.

Mallissa rajoitteina ovat mm. ensimmäinen vaihto aika linjojen i ja j välillä, muut mahdolliset vaihtoajat linjojen i ja j välillä (riippuvat ensimmäisestä vaihtoajasta sekä linjojen vuoroväleistä), vaihtojakso eli vuorovälien pienin yhteinen jaettava, matkustajamäärät sekä minimivaihto aika. Malli on MIP-malli (mixed integer programming), ja sen ratkaisun hakeminen on sitä monimutkaisempaa mitä suurempi tarkasteltava verkko on.

Poorjafari et al. (2014) testasivat malliaan yksinkertaisella kolmen linjan verkolla. Ratkaisu haettiin käyttäen geneettisiä algoritmeja ja Matlab-ohjelmistoa. Lopputuloksena algoritmista saatiin minuuttimäärät, joilla tarkasteltavien linjojen lähtöaikoja on siirrettävä optimaalisten aikataulujen saavuttamiseksi. Näillä uusilla aikatauluilla yhteenlaskettu vaihto aika väheni esimerkissä 33,3 %, mikä osoittaa, että aikataulujen synkronoinnilla voidaan saavuttaa merkittäviä matka-aikasäästöjä matkustajille.

## 3 Liikennemallit

### 3.1 Yleistä

Liikennemalleja voidaan käyttää suunnittelun ja päätöksenteon tukena, kun todellista dataa ei ole saatavilla. Malleilla voidaan muun muassa ennustaa ja kuvata tulevaa kehitystä sekä erilaisten muutosten vaikutuksia liikennejärjestelmään. Malleilla voidaan saada tietoa esimerkiksi liikenteen suuntautumisesta, liikennemääristä sekä matka-ajoista, ja näitä voidaan hyödyntää suunnittelupäätöksiä tehtäessä kokemuseräisen tiedon ohella. (RIL 2005)

Liikenne-ennusteita voidaan laatia valtakunnallisesti, seudullisesti, paikallisesti tai tiettyä hanketta koskien. Ennusteita voidaan myös tehdä joko lyhyellä tai pitkällä aikatahlaimella tarpeesta riippuen. Yksittäisen toimenpiteen vaikutustarkasteluja varten riittää lyhyemmän tähtäimen malli, kun taas liikennejärjestelmäsuunnitelmien tueksi tarvitaan vuosikymmenten päähän ulottuvia ennusteita. (RIL 2005)

Liikennemallit voidaan jakaa mikro-, meso- sekä makrotason malleihin. Mikromalleilla mallinnetaan yksittäisten ajoneuvojen liikkumista ja vuorovaikutusta, ja näillä on mahdollista saada hyvin tarkkoja tietoja esimerkiksi viivytyksistä risteyksissä. Tällaisen mallin rakentaminen on hyvin työlästä ja vaatii tarkkoja lähtötietoja mm. kääntymiskaistojen pituuksista sekä valo-ohjauksesta. Mikrotason mallit soveltuvat parhaiten yksittäisten tai muutamien risteysten välityskytkytarkasteluihin. (Käräjämies 2000)

Makrotason malleilla voidaan kuvata kokonaisia liikennejärjestelmiä, kuten kaupunki, kaupunkiseutu tai jopa kokonaisen maan liikenne. Makromalleissa tietoa yhdistellään ajan ja paikan mukaan, jolloin lopputuloksina saadaan esimerkiksi keskimääräinen matka-aika ja kokonaismatkamäärä alueelta toiselle aamuhuipputunnin aikana. Mesotason malleissa on sekä mikro- että makrotason ominaisuuksia, jolloin lähtötietojen syöttäminen ja laskenta helpottuu, mutta saadaan tarkempia tuloksia kuin makrotason malleilla. Mesotason malleja on käytetty esimerkiksi älyliikennehankkeiden arvioinnissa. (Florian et al. 2001)

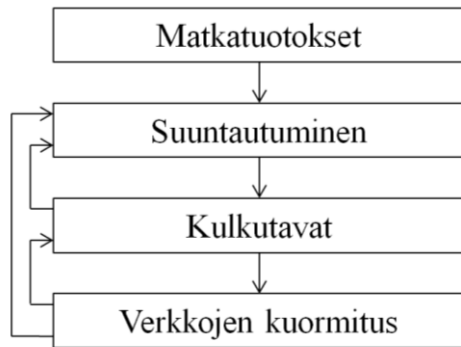
Myös aikatauluihin perustuvia malleja voi olla sekä mikro- että makrotasoisia, riippuen sekä kysynnän että tarjonnan kuvauksen tarkkuudesta. Mikrotason mallissa kysyntä ja tarjonta kuvataan molemmat yksilötasolla siten, että esimerkiksi matka-aika perustuu yksittäisen ajoneuvon ominaisuuksiin ja vuorovaikutukseen toisten ajoneuvojen kanssa, ja kysyntä muodostuu yksittäisen matkustajan käyttäytymisestä ja valinnoista. Makrotason mallissa joko kysyntä, tarjonta tai molemmat perustuvat suuremman joukon keskimääräiseen käytökseen. (Nuzzolo ja Crisalli 2009)

Ennusteiden tarkkuus riippuu paitsi itse mallin oikeellisuudesta, myös lähtötietoina käytettävistä selittävien muuttujien ennusteista. Liikenne-ennusteita tarkasteltaessa täytyykin muistaa, että parhaatkin mallit ovat aina vain arvioita, jotka perustuvat tiettyihin oletuksiin tulevasta kehityksestä, minkä vuoksi lyhyenkään tähtäimet ennusteet eivät usein toteudu sellaisenaan. (RIL 2005)

### 3.2 Neliporrasmalli

Perinteisesti liikenne-ennustemallit noudattelevat neliporrasmallia, joka jakautuu matkatuotosten ja matkojen suuntautumisen mallintamiseen, kulkutavan valintaan sekä liikennevirtojen sijoitteluun. Mallin portaiden välillä käytetään takaisinkytkentää, sillä liikennejärjestelmä vaikuttaa mm. matkojen suuntautumiseen. Malleille on myös muita vaih-

toehtoisia rakenteita, mutta neliporrasmalli on yleisimmin käytetty. Mallin perusrakenne on esitetty kuvassa 4. (RIL 2005)



Kuva 4. Neliporrasmalli (RIL 2005, s. 245).

Mallintamista varten tarkastelualue jaetaan pienempiin osa-alueisiin, joiden sisäisiä ja välisiä matkoja pyritään ennustamaan tutkimusaineiston perusteella muodostetuilla matemaattisilla malleilla. Lähtötietoina käytetään mm. väestötietoja, kuten ikärakennetta ja tulotasoa alueittain, sekä tietoa erilaisten toimintojen kuten koulujen, työpaikkojen, kauppojen ja julkisten palvelujen sijoittumisesta. Näiden tietojen perusteella muodostetaan ensin kunkin alueen matkatuotos ja sen jälkeen matkojen suuntautuminen alueelta toiselle eli matkamatriisit. Kolmannessa vaiheessa jaetaan muodostuneet matkat eri kulkutapojen kesken, jolloin saadaan kullekin kulkutavalle omat matriisit. Viimeisessä vaiheessa määritellään näiden matkojen käyttämät reitit, eli sijoitellaan ne liikenneverkolle. Ajoneuvoliikenne ja joukkoliikenne voidaan sijoitella joko erillisinä tai siten, että kulkutapojen sijoittelutulokset vaikuttavat toisiinsa. Mallin kolmea viimeistä vaihetta iteroidaan, kunnes tulos ei enää merkittävästi muutu kierrosten välillä. (Ortúzar ja Willumsen 1994)

Ennustemallit voidaan jakaa kasvukerroinennusteisiin sekä ryhmä- ja yksilömalleihin. Kasvukerroinmenetelmissä tulevaa kehitystä ennustetaan vanhojen tietojen pohjalta kasvukertoimia käyttäen. Menettelytapa soveltuu pienten muutosten tarkasteluun, mutta sillä ei pystytä ennustamaan merkittävien muutosten vaikutuksia. Laajempiin tarkasteluihin käytetään analyyttisiä ryhmä- tai yksilömalleja (aggregate and disaggregate models) riippuen siitä, halutaanko tarkastella keskiarvotietoa vai yksittäisiä valintoja. Henkilöliikennettä käsiteltäessä käytetään nykyään yleensä yksilömalleja. (RIL 2005)

Usein esimerkiksi kulkutavanvalintaa mallinnetaan logittimallilla, joka on tyypillinen yksilömalli. Logittimallissa vaihtoehdon valintatodennäköisyys riippuu yksilön ja tarjolla olevien vaihtoehtojen ominaisuuksista ja eri vaihtoehtoja arvotetaan hyötyfunktioden avulla. Multinomisen logittimallin mukaan vaihtoehdon  $i$  valintatodennäköisyys  $P_i$  on

$$P_i = \frac{e^{V_i}}{\sum_{j=1}^J e^{V_j}} \quad (6)$$

missä:

$V_i$  = vaihtoehdon  $i$  hyötyfunktion arvo

$J$  = vaihtoehtojen lukumäärä. (RIL 2005)

Neliporrasmallia on kritisoitu siitä, että se ei huomioi riittävän hyvin yksilöllisiä vaihteluita. Ilman vaiheiden iterointia tulokset voivat myös olla epärealistisia ja mm. aliarvioida joukkoliikenteen houkuttelevuutta. Myös matkatuotokset, kulkutavanvalinnan ja

sijoittelun samanaikaisesti laskevien yhdistelmämallien (combined models) puutteena on, että ne eivät kykene luontevasti käsittelemään useista osavaiheista koostuvia matkaketjuja, kuten työmatkan yhteydessä suoritettavaa asiointimatkaa. Ratkaisuksi on esitetty mm. aktiviteetteihin perustuvaa mallinnusta (activity based model). (Vuchic 2005)

Seuraavassa luvussa on kuvattu tarkemmin neliporrasmallin viimeistä vaihetta, matkojen sijoittelua, johon tässä työssä keskitytään.

### 3.3 Liikenteen sijoittelu

Liikenteen sijoittelussa määritellään ennustettujen matkojen käyttämät reitit. Sijoittelussa käytettävä liikenneverkko koostuu solmuista ja näiden välisistä linkeistä. Solmut voivat kuvata esimerkiksi risteyskohtia, pysäkkejä tai tietyn osa-alueen kaiken liikenteen verkolle tuottavia syöttöpisteitä. Linkit taas voivat kuvata mm. katuosuuksia, kevyen tai joukkoliikenteen väyliä, vaihtoyhteyksiä tai syöttöä syöttöpisteestä liikenneverkolle. Linkeille voidaan määritellä mm. maksimikapasiteetti sekä funktioita, jotka määrittävät liikennemäärien vaikutukset ajoneuvojen nopeuteen linkillä. Sijoittelussa käytetään tiheämpää osa-aluejakoa kuin ennustevaiheessa, jotta saadaan riittävän tarkkoja tuloksia. Alueiden tulee olla maankäytön ja väestön osalta tarpeeksi homogeenisia. (RIL 2005)

Sijoittelussa kullekin matkalle valitaan reitti lähtö- ja määräpaikan välillä vaihtoehtoisten reittien matkavastusten perusteella. Yleensä kriteerinä käytetään pelkän matkan pituuden sijaan ns. yleistettyä matkavastusta, joka voi sisältää tietoa myös reitin nopeudesta ja kustannuksista. Sijoittelussa voidaan myös olettaa, että käytettävien linkkien kapasiteetti ei rajoita matkanopeuksia (muuttumattoman reittivastuksen menetelmät), mutta yleensä käytetään muuttuvien reittivastusten menetelmiä, jolloin linkin kuormittuminen laskee nopeuksia pikku hiljaa. (RIL 2005)

Sijoittelu voidaan tehdä joko yhdelle houkuttelevimmalle reitille tai useille eri reiteille. Yhden reitin sijoittelu (all-or-nothing assignment) on helppoiten toteutettava menetelmä, mutta sen antamat tulokset ovat epätarkimpia ja voivat olla hyvinkin epärealistisia, mikäli käytetyn linkin kapasiteetti ei riitä ja matka-ajat kasvavat sijoittelun alussa oletetusta. Usean reitin sijoittelu voidaan toteuttaa joko sijoittelukäyrämenetelmällä (assignment curves method) tai kapasiteettirajoitetulla sijoittelulla (capacity restraint model). Sijoittelukäyrämenetelmässä suunnittelija päättää sijoittelukriteerien ja kokemustiedon perusteella, kuinka houkuttelevia eri reittivaihtoehdot ovat suhteessa toisiinsa, ja matkat sijoitellaan tässä suhteessa. Menetelmän on todettu antavan hyviä tuloksia ainakin kaupunkiolosuhteissa. (Vuchic 2005)

Yleisin autoliikenteen sijoittelumenetelmä perustuu kapasiteettirajoitukseen, jolloin liikennemäärät kullakin reitillä vaikuttavat nopeuteen, joka vaikuttaa jälleen liikennemääriin. Lopullinen sijoittelutulos saadaan iteroimalla näitä vaihteita, kunnes tulos ei muutu. Ruuhkautumisen vaikutuksia matka-aikaan voidaan kuvata kaavalla

$$T = T_0 \left[ 1 + 0.15 \left( \frac{V}{C} \right)^4 \right] \quad (7)$$

missä:

$T$  = matka-aika ruuhkatilanteessa

$T_0$  = vapaan liikennevirran mukainen matka-aika

$V$  = sijoiteltu liikennemäärä

$C$  = linkin kapasiteetti (Vuchic 2005).

Laskennassa minimoidaan yleensä yksittäisten käyttäjien kokemaa matkavastusta, jolloin tuloksena saadaan käyttäjän optimi, jossa kukaan ei voi reittiä muuttamalla enää löytää edullisempaa vaihtoehtoa (Wardropin ensimmäinen periaate). Tasapaino voidaan hakea myös järjestelmän optimin mukaan, jolloin jotkut matkustajat pidentävät matka-aikojaan, jotta saavutetaan koko järjestelmän tasolla lyhimmat matka-ajat (Wardropin toinen periaate). Näissä menetelmissä oletetaan, että kaikki matkustajat kokevat matka-ajat samalla tavalla, mutta todellisuudessa eri käyttäjien käsitykset matka-ajasta saattavat hieman vaihdella. Stokastisilla malleilla voidaan määrittää todennäköisyydet tietyn reitin valinnalle, kun oletetaan, että koettu matka-aika on satunnaisesti jakautunut. (Vuchic 2005)

Perinteinen joukkoliikenteen sijoittelumalli perustuu joukkoliikennelinjojen vuoroväleihin. Menetelmä sopii hyvin etenkin tulevaisuuden liikennejärjestelmien tarkasteluun, jolloin tarkkaa aikataulua ei vielä ole. Se soveltuu myös tiheän kaupunkiliikenteen mallintamiseen, kun keskimääräiset odotusajat ovat lyhyitä ja matkustajien ei tarvitse tuntea aikatauluja liikkuakseen. Vuorovälipohjainen sijoittelu toimii hyvin, mikäli halutaan verrata nykyjärjestelmää tulevaan liikenneverkkoon, jonka aikatauluja ei vielä ole laadittu. Aikatauluihin perustuvaa joukkoliikennesijoittelua suositellaan käytettäväksi harvan vuorotarjonnan alueilla ja sellaisissa tilanteissa, missä vaihtojen yhteensovittaminen on tärkeää. Aikaan sidottu sijoittelu sopii huonosti pitkälle tulevaisuuteen ulottuviin tarkasteluihin, sillä tarvittavia aikataulutietoja ei vielä ole käytettävissä. (PTV 2012, s.421, 446)

Vuorovälipohjaisessa sijoittelussa kysyntää käsitellään (yleensä tunnin) keskiarvona, kun taas aikataulupohjaisessa sijoittelussa kysyntä kohdistetaan täsmälleen tiettyyn ajanhetkeen. Aikataulusijoittelua varten kysyntätietoa pitää saada tarkennettua jollakin keinolla, esimerkiksi jakamalla kysyntämatriisit minuutin tai viiden minuutin aikaviipaleisiin. Aikataulupohjaista liikennemallia varten tarvitaan lähtöpaikamääräpaikka -matriisin aikajakauma, joka määrittää käyttäjien tavoiteltujen lähtö- tai perilläoloaikojen jakauman; tarjonnan kuvaus yksittäisten vuorojen pysäkkien ohi-tusaikojen tarkkuudella sekä reitinvalinta- ja sijoittelumallit, jotka muuttuvat dynaamisesti joko vuorokaudenajan (within-day) tai viikonpäivän mukaan (day-to-day). Kysynnän kuvaus aikataulupohjaisessa mallissa perustuu matkustajien toivottuihin matkustusajankohtiin (target time, TT), jotka voidaan jakaa toivottuihin lähtöaikoihin (desired departure time, DDT) ja saapumisaikoihin (desired arrival time, DAT). (Nuzzolo ja Crisalli 2009)

Dérian (1999) tutki aikataulupohjaisen sijoittelun sovellettavuutta Geneven alueella. Hän jakoi huipputunnin kysynnän viiden minuutin aikaviipaleisiin (12 kpl), jotka ovat hieman lyhyempiä kuin perusvuorovälit 6 ja 7,5 minuuttia. Tällä varmistetaan, että jokainen vuoro voi saada matkustajia. Seutuliikenteessä, jossa on merkittävästi harvemmat vuorovälit ja matkustajat ovat tietoisempia aikatauluista, hän painotti lisäksi kutakin ajanjaksoa ”hukka-ajan” (lost time) käänteisluvulla tai tämän neliöllä, joka saadaan vähentämällä huipputunnin aikana saavutettu lyhin matka-aika kunkin ajanjakson matka-ajasta. Tällöin ajanhetket, jolloin matka-aika on lyhyin, keräävät enemmän matkustajia.

Joukkoliikennejärjestelmässä on tärkeää huomioida myös epäsäännöllisyyden vaikutuksia. Näitä voidaan tarkastella joko eksplisiittisesti vertailemalla suunniteltua aikataulua erilaisiin epäsäännöllisyyden aiheuttamiin vaihtoehtoihin, tai implisiittisesti lisäämällä reitinvalintamallin hyötyfunktioon satunnainen termi vastaamaan liikenteen epäluotettavuuden aiheuttamaa häiriötä. (Nuzzolo ja Crisalli 2009)

Matkustajien käyttäytyminen ja valintamahdollisuudet riippuvat paitsi käyttäjän, myös tarjonnan ominaisuuksista, erityisesti vuorovälistä. Reitinvalintamallit on tämän vuoksi jaoteltu vuorovälin mukaan siten, että pidemmän vuorovälin alueilla, kuten haja-asutusalueilla tai seudullisessa liikenteessä oletetaan, että matkustajat hyödyntävät täydellistä aikatauluinformaatiota matkapäätöksiä tehdessään, jolloin sekä käytettävä pysäkki että liikennevuoro valitaan jo ennen matkaa. Kun vuoroja ja siten valinnanvaraa on paljon, kuten kaupunkiliikenteessä, matkustajien pysäkille saapumiset eivät riipu niinkään aikatauluista, vaan matkustamiseen vaikuttaa liikennevälineiden ruuhkautuminen, joka vähentää matkustusmukavuutta. Ruuhkautumista voidaan mallintaa joko implisiittisesti kasvattamalla jatkuvasti linkin kustannusfunktioita matkustajamäärän kasvessa, tai eksplisiittisesti asettamalla yksittäisille ajoneuvoille kapasiteettirajat. (Nuzzolo ja Crisalli 2009)

Nuzzolo ja Crisalli (2009) esittelevät myös erilaisia ohjelmistoja, joihin on sisällytetty aikataulupohjainen reitinvalinta ja sijoittelu. Kaupallisista ohjelmista mainitaan Emme, Visum ja Omnitrans. Näiden lisäksi on kehitetty myös ei-kaupallisia sovelluksia yksittäisiä projekteja tai yrityksiä varten, joita on sovellettu mm. harvan liikenteen suunnittelun ja päätöksenteon tukena. Seuraavassa luvussa on esitelty tarkemmin muutamia näistä ohjelmista.

### **3.4 Malliohjelmat**

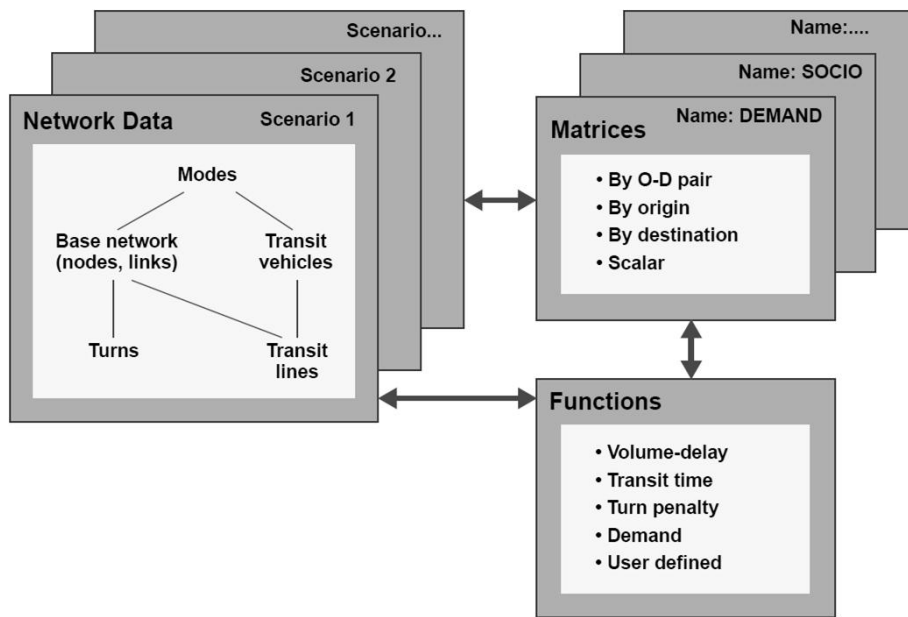
Markkinoilla on lukuisia erilaisia liikenteen mallinnusohjelmistoja erityyppisiä tarkastelua varten. Tässä luvussa on esitelty joitakin makromalleja sekä vertailtu näiden ominaisuuksia.

#### **3.4.1 Emme**

Emme on kehitetty 70-luvun lopulla Montrealin yliopiston liikennetutkimusryhmässä. Vuodesta 1986 ohjelmaa on kehittänyt INRO. Emme on yleisin Suomessa käytetty liikenteen sijoitteluohjelma. Tässä kappaleessa on esitelty lyhyesti ohjelman rakennetta ja sijoittelumenetelmiä. Kappaleen tiedot perustuvat Emmen manuaaliin (INRO 2013). Lisää esimerkkejä erilaisten sijoittelumenetelmien toiminnasta on esitetty mm. Petja Partasen diplomityössä (2000).

Emmen tietokantaa kutsutaan Emme-pankiksi, ja se sisältää tiedot tutkimusalueen liikenneinfrastruktuurista, taloudellisista toiminnoista sekä väestön sosio-ekonomisista ominaisuuksista. Emme-pankissa nämä tiedot on kuvattu verkon skenaarioina, mat-  
riiseina ja funktioina kuvan 5 mukaisesti.

### Emme Database



Kuva 5. Emme-pankin rakenne (INRO 2013, s. 1-3).

Emmeen on toteutettu neljä erilaista sijoittelutoimintoa: ajoneuvoliikenteen tasapainosijoittelu, joukkoliikenteen usean reitin sijoittelu (perinteinen vuorovälisijoittelu), joukkoliikenteen yksittäisen matkan sijoittelu sekä joukkoliikenteen aikataulusijoittelu. Ajoneuvoliikenteen tasapainosijoittelu noudattaa Wardropin ensimmäistä periaatetta, jolloin tuloksena on käyttäjien optimi.

Joukkoliikenteen vuorovälisijoittelu perustuu strategian käsitteeseen, jossa matkustaja valitsee määritellyistä ”houkuttelevista linjoista” ensimmäisenä saapuvan vaihtoehdon, ja nousee pois ennalta määritellyllä pysäkillä. Kussakin solmussa voidaan joko odottaa houkuttelevaa linjaa saapuvaksi tai kävellä solmusta toiseen, ei molempia. Odotusaika solmussa sekä todennäköisyys kulkuvälineeseen nousulle riippuvat solmua käyttävien houkuttelevien linjojen yhdistetystä vuorovälistä. Reitti valitaan lyhimmän yleistetyn matka-ajan odotusarvon perusteella. Sijoittelu olettaa, että matkustajilla on käytössään tarkat tiedot eri vaihtoehtojen matka-ajoista. Se ei oletusarvoisesti myöskään huomioi yksilöllisiä vaihteluita eri vaihtoehtojen houkuttelevuudessa, vaan kaikilla matkustajilla on sama strategia.

Sijoittelu voidaan kuitenkin toteuttaa myös siten, että alueelta lähtevä liikenne jaetaan linkeille logittimallin tai käyttäjän määritelmän mukaan, jolloin saadaan erilainen matkajakauma ja myös keskimääräiset matka-ajat ovat pitempiä kuin sijoittelun optimistrategiassa. Pysäkiltä lähtevät liikennevirrat voidaan myös vaihtoehtoisesti sijoitella linjojen vuorovälien ja matka-aikojen perusteella pelkkien vuorovälien sijaan. Myös tämä menetelmä tuottaa hieman erilaisen jakauman ja matka-ajat kuin optimistrategia.

Emmen sijoittelu tehdään oletusarvoisesti yhdelle tunnille, ja mm. viivefunktioiden kapasiteetit on yleensä mitoitettu tunnin mukaan. Mikäli tarkastelu halutaan tehdä jollakin muulla aikavälillä, funktiot ja pohjaliikenne on skaalattava tarkastelujakson mukaan.

Extended-sijoittelutyökalu antaa lisää valintamahdollisuuksia sijoitteluun. Työkalulla voidaan mm. käyttää odotusaikakerrointa ilmaisemaan todellisen odotusajan osuutta

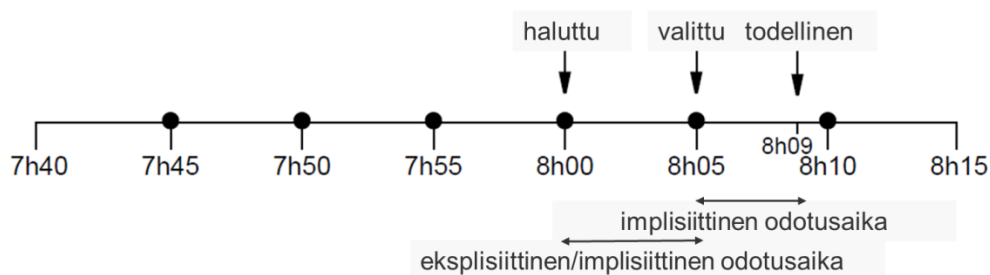
odotusarvosta. Säännöllisellä liikenteellä muuttujan arvo on 0,5, pienempi jos matkustajien oletetaan tuntevat aikataulut tarkasti ja suurempi mikäli bussit jonoutuvat. Extended-sijoittelussa voidaan tarkastella myös mm. pelkkien kävelymatkojen vaikutuksia sijoittelutuloksiin (connector-to-connector paths) sekä sallia sentroidista lähtevän liikenteen jakautuminen useammalle kuin yhdelle optimaaliselle konnektorille joko käyttäjän määrittelemissä suhteissa tai logittimallin perusteella.

Emmen aikaan sidottu joukkoliikennesijoittelu etsii matkustajan optimireitin lähtö- ja määräpaikan sekä lähtö- tai saapumisaajan perusteella. Reitin valinta perustuu painoker-toimiin ja matkan yleistettyyn kustannukseen, kuten vuorovälisijoittelussakin. Aikataulusijoittelussa voi lisäksi painottaa etuajassa matkustamista ja myöhästymistä eri ker-toimilla. Valittava laskentatarkkuus (esim. 1, 5 tai 10 min) vaikuttaa paitsi tulosten tarkkuuteen, myös tarvittavaan laskenta-aikaan.

Sijoiteltavat matkat määritellään joko käsin tai eräajotiedostona, ja jokaiselle matkalle määritellään haluttu lähtöaika (target time) (vastaavasti saapumisaika). Matkan todellinen lähtöaika (actual departure time) saattaa poiketa halutusta esimerkiksi joukkoliikenteen aikataulujen vuoksi. Halutun ja todellisen lähtöajan erotuksena muodostuu lähtöajan poikkeama (earliness tai lateness). Mikäli matkalle on määritelty vain yksi sallittu lähtöaika, tämän sallitun lähtöajan ja todellisen lähtöajan erotus määritellään kokonaisuudessaan implisiittiseksi odotusajaksi. Implisiittinen odotusaika kuvaa joukkoliikennevälineen saapumisen odottamista eli varsinaista odotusta.

Mikäli sallittuja lähtöaikoja on useita, valitaan näistä viimeinen todellista lähtöaikaa edeltävä ajankohta. Tällöin implisiittistä odotusaikaa on valitun ja todellisen lähtöajan välinen aika. Halutun ja valitun lähtöajan välinen aika taas määritellään eksplisiittiseksi odotusajaksi. Eksplisiittinen odotusaika voi olla myös halutusta lähtöajankohdasta taaksepäin laskettavaa aikaa, eli se ei täysin vastaa perinteistä odotteluajan määritelmää, mutta se kuvaa samankaltaisesti matkustajan kokemaa vastusta sellaisessa tilanteessa, jossa hän ei pääse lähtemään haluamanaan ajanhetkenä. Implisiittinen ja eksplisiittinen odotusaika tallentuvat omaan matriisiinsa, eivät osaksi odotusaikaa.

Emmen aikataulusijoittelun käyttämiä odotusajakäsitteitä on havainnollistettu kuvassa 6. Kuvan esimerkissä haluttu lähtöaika on 8.00 (+10 ja -15 minuuttia), ja ajan resoluutioksi on määritetty viisi minuuttia. Tämä mahdollistaa lähdöt klo 7.45, 7.50, 7.55, 8.00, 8.05 sekä 8.10. Todellinen lähtöaika on 8.09, jolloin lähtöajaksi valitaan tätä edeltävä sallittu lähtöaika 8.05. Tällöin todellisen ja valitun lähtöajan väli 8.05-8.09 on implisiittistä odotusaikaa. Klo 8.00 ja 8.05 välinen aika voidaan käsittää joko eksplisiittiseksi tai implisiittiseksi odotusajaksi. Mikäli eksplisiittisen odotusajan painokerroin on yli yksi, kannattaa tämä aikaväli tulkita implisiittiseksi odotukseksi, joka on tällöin matkustajalle edullisempaa. Mikäli ainoa sallittu lähtöaika olisi haluttu 8.00, koko aikaväli 8.00-8.09 tulkittaisiin implisiittiseksi odotusajaksi.



Kuva 6. Odotusajakäsitteet Emmen aikataulusijoittelussa (INRO 2013, s. 4-416).



Algoritmi laskee optimaalisen reitin alkupisteestä (tai loppupisteestä, jos sijoitettava matka on määritelty saapumisajan avulla) alkaen vertaamalla vaihtoehtoisten tapahtumien kustannuksia. Uusi myöhempi tapahtuma valitaan, jos sen kustannus sekä painotettu odotusaika aiemman ja myöhemmän tapahtuman välillä on pienempi kuin aiemman tapahtuman kustannus eli

$$c_r + (t_p - t_r) * w > c_p \quad (8)$$

missä:

$c_r$  = aiemman tapahtuman kustannus

$c_p$  = myöhemmän tapahtuman kustannus

$t_r$  = aiemman tapahtuman tapahtuma-aika

$t_p$  = myöhemmän tapahtuman tapahtuma-aika

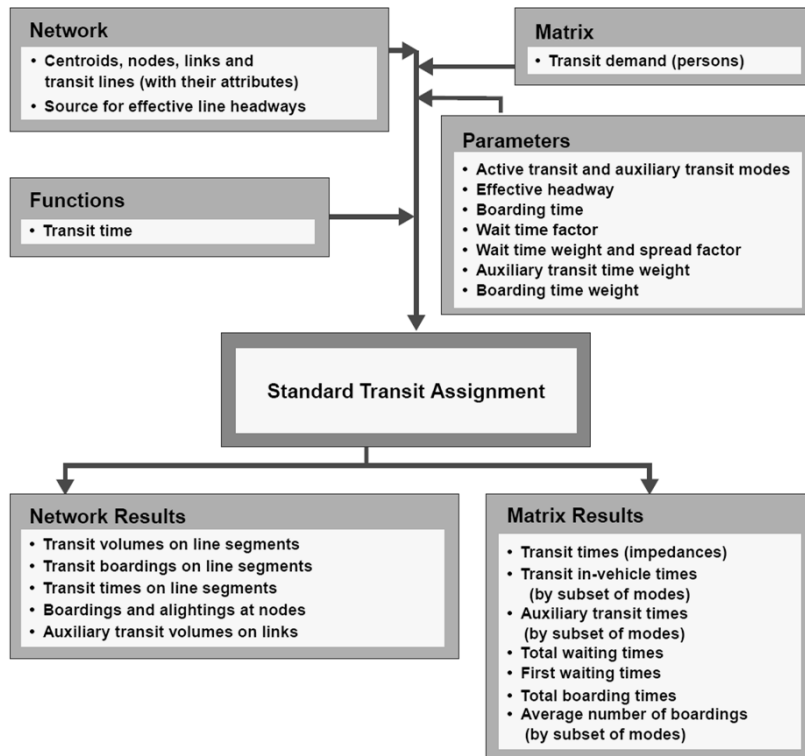
$w$  = odotusajan painokerroin.

Joukkoliikenteen perinteisen vuorovälisijoittelun sekä aikataulusijoittelun syöttö- ja tulostiedostot on esitetty kuvissa 7 ja 8. Aikataulusijoittelussa voidaan käyttää samaa verkon kuvausta kuin vuorovälisijoittelussa, ainoastaan linjatiedostot on koodattava tarkemmin. Täsmälliset aikataulut koodataan linjatiedostoon vuorovälin, poikkeaman ja lähtöjen määrän avulla. Poikkeama kertoo ensimmäisen lähdön ajankohdan, ja lähdöt toistuvat annetulla vuorovälillä lähtöjen määrän verran. Tästä määrittelytavasta johtuen vuorovälin tai ajoaikojen muuttuessa lähdöt pitää koodata omiksi linjoikseen. Tämä saattaa kasvattaa tarvittavaa lisenssikokoa, mikäli linjasegmenttien maksimimäärä ylittyy.

Myös aikataulusijoittelussa käytettävät parametrit ovat hieman erilaiset kuin vuorovälisijoittelussa. Aikataulusijoittelussa tarvittavat parametrit ovat nousuvastus, nousun painokerroin ja kävelyajan paino. Käytössä on myös sellaisia parametreja, joita vuorovälisijoittelussa ei käytetä. Tällaisia parametreja ovat minimiodotusaika, matkan maksimi-aika ja -kustannus, ajan resoluutio, maksimiarvot etuajassa ololle ja myöhästymiselle, sekä etuajan ja myöhästymisen painokertoimet. Lisäksi määritellään painokerroin ajoajalle, joka perinteisessä sijoittelussa on aina yksi.

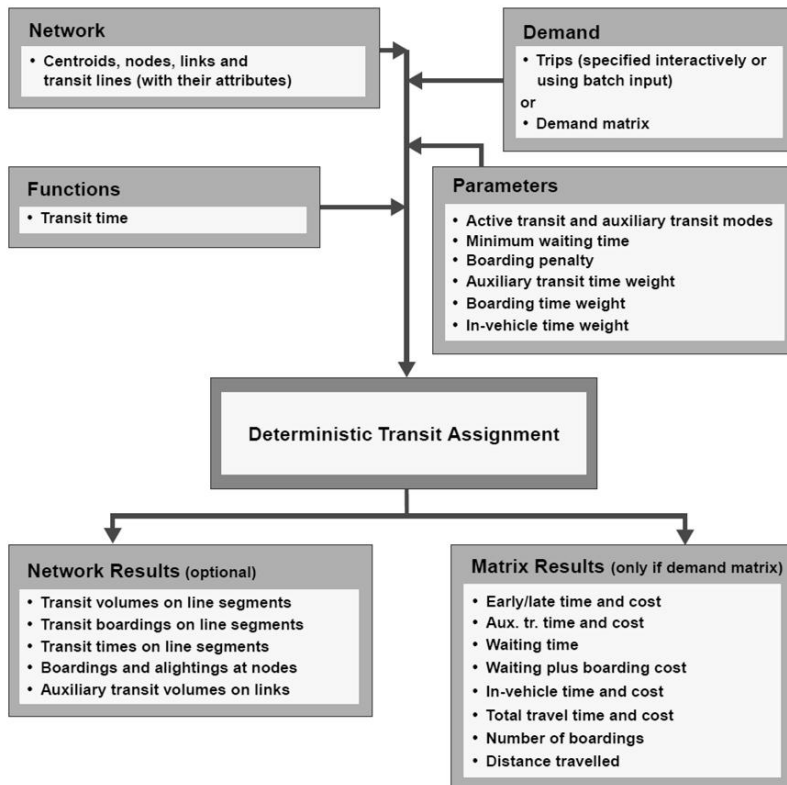
Keskeisenä erona vuorovälisijoitteluun nähden on, että vuorovälipohjaisessa sijoittelussa matka-ajan komponentteja painotetaan suhteessa ajoaikaan (in-vehicle time), kun taas aikataulusijoittelussa vertailukohtana on implisiittinen odotusaika. Implisiittisellä odotusajalla pyritään kuvaamaan aikaa, jonka matkustaja odottaa joukkoliikennevälineen saapumista ("varsinainen odotus"). Implisiittinen odotusaika riippuu sijoittelussa käytetävästä ajan resoluutiosta, minkä vuoksi se ei ole suoraan verrattavissa perinteiseen odotusajan käsitteeseen. Myöskään ajoajalle ei voi antaa painokertoimeksi alle yhtä, jotta päästäisiin nykymallia vastaavaan tilanteeseen (ajoajan paino = 1, odotusajan paino = 1,5), sillä tämä aiheuttaisi epärealistisia tilanteita sijoittelussa, kun matkustajalle olisi edullisempaa käyttää odotusaikansa matkustaen esimerkiksi silmukka toisella linjalla. Aikataulusijoittelussa on siis syytä käyttää erilaisia parametreja kuin perinteisessä sijoittelussa käytetyt. Tässä diplomityössä käytetyt parametrit on kuvattu luvussa 5.3.3. (Paranen 2000)

#### Input and output of the standard transit assignment



Kuva 7. Emmen perinteinen joukkoliikennesijoittelu (INRO 2013, s. 4-266).

#### Input and output of the deterministic transit assignment

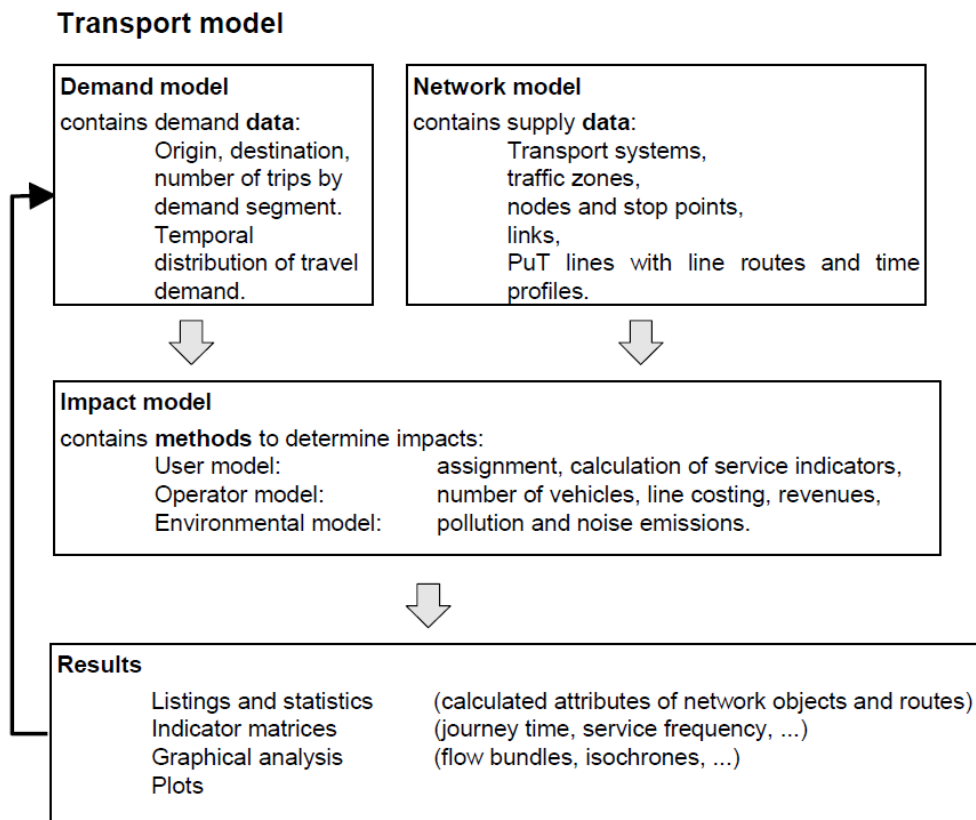


Kuva 8. Emmen aikataulusijoittelu (INRO 2013, s. 4-274).

### 3.4.2 Visum

Visum on saksalaisen PTV Groupin ohjelmisto, johon kuuluu työkaluja kysynnän mallintamisesta ja liikennejärjestelmäsuunnittelusta liikennöinnin ja autokiertojen suunnitteluun. Visum tarjoaa myös erilaisia liikennetarjonnan visualisointimenetelmiä. (PTV 2013) Tässä kappaleessa on esitelty järjestelmän ominaisuuksia sekä osin vertailtu niitä Emme-mallin kanssa. Kappaleen tiedot perustuvat Visumin manuaaliin (PTV 2012). Visum valittiin tarkasteluun suositusten perusteella mm. helppokäyttöisyyden ja monipuolisten aikataulujen käsittelymahdollisuuksien vuoksi (mm. Anttila 2013, Kalenoja 2012). Visumin etuna on myös sen integroituminen PTV:n muihin malleihin, kuten Visim-mikrosimulointiohjelmaan (Räty 2013).

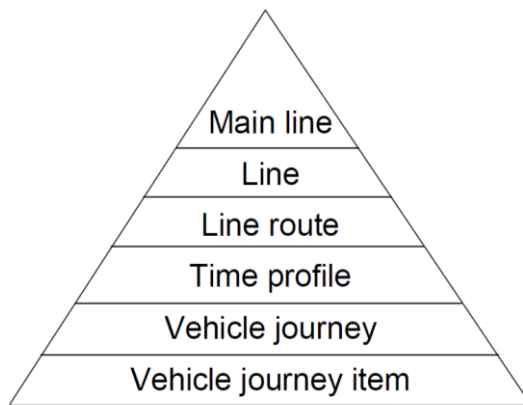
Visum-malli jakautuu kolmeen osaan: kysyntämalliin, verkkomalliin sekä vaikutusmalleihin (impact models). Kysyntämallilla lasketaan liikenteen kysyntätietoja ja verkkomallilla kuvataan liikenteen tarjontaa. Vaikutusmallit käyttävät näitä tietoja tuottamaan tuloksia analyysin ja arvioinnin tueksi. Visum-mallin rakenne on esitetty kuvassa 9.



Kuva 9. Visum-mallin rakenne (PTV 2012, s. 2).

Visumin verkkomalli koostuu hyvin samanlaisista elementeistä kuin Emmenkin malli, mutta osa elementeistä on erikoistuneempia. Solmujen ja linkkien lisäksi Visumin verkko koostuu mm. vyöhykkeistä (zones), jotka kuvaavat matkojen lähtö- ja määräpaikka-alueita, pysäkeistä sekä erillisistä alueista (territories), joille voidaan laskea tunnuslukuja. Visumissa on mahdollista tarkastella lisäksi eri liikennöitsijöitä (operator) sekä tallentaa samanaikaisesti useita eri autokiertoversioita (block version). Myös joukkoliikenteen tarjonnan kuvaus poikkeaa Emmen vastaavasta, sillä Visumissa linjasto on kuvattu hierarkkisella rakenteella kuvan 10 mukaisesti. Emmessä taas voi

esimerkiksi yhdellä linjalla olla vain yhdet aikataulut, ja jos aikataulu muuttuu kesken tarkastelujakson, tämä joudutaan mallissa kuvaamaan kahtena eri linjana.



Kuva 10. Joukkoliikennetarjonnan hierarkkinen rakenne Visum-mallissa (PTV 2012, s. 54).

Visumissa on käytössä kolme erilaista joukkoliikenteen sijoitteluvaihtoehtoa, joiden lähtötietovaatimukset, tarkkuustaso sekä laskenta-aika vaihtelevat. Joukkoliikenteen ”järjestelmäsijoittelu” (system-based procedure) auttaa hahmottamaan joukkoliikenteen kysyntää, eikä vaadi tietoa joukkoliikenneverkosta. Toiminto laskee joukkoliikenteen yhden reitin sijoittelun ja tuottaa karkean tason ideaaliverkon. Vuoroväliperusteinen sijoittelu (headway-based procedure) on perinteinen tapa mallintaa tiheää kaupunkiliikennettä sekä tulevaisuuden liikenneverkkoja, joista ei ole vielä olemassa tarkkoja tietoja. Aikataulusijoittelu (timetable-based procedure) sopii etenkin pitkän vuorovälin liikenneverkoille ja silloin, kun vaihtojen koordinointi on tärkeää. Sijoitteluista voidaan laskea erilaisia tunnuslukuja, joita Visumissa kutsutaan nimellä skim.

Visumissa on kaksi hieman erilaista aikataulusijoittelumenetelmää: branch & bound -menetelmä, joka hakee tarkasteluajanjaksolta kaikki mahdolliset yhteydet useiden kriteerien perusteella, sekä lyhimmän polun menetelmä (shortest path), joka hakee kullekin lähtöajalle vain yhden vaihtoehdon. Branch & bound –menetelmän algoritmi vertailee pareittain kahta (osa)yhteysvaihtoehtoa, ja tallentaa kelvollisten vaihtoehtojen tiedot puumaiseksi rakenteeksi (branch). Selkeästi heikommät vaihtoehdot jätetään pois (bound). Vertailun pohjana algoritmi käyttää hakuvastusta (search impedance), joka muodostuu matka-ajasta, vaihtojen määrästä, järjestelmätason tekijöistä, kuten hinnasta, sekä yksittäisen lähdön vastuksesta.

Lyhimmän polun menetelmä etsii haluttuna lähtöaikana matkavaihtoehdon, jonka vastus on pienin. Algoritmia voidaan toistaa useita kertoja, jolloin voidaan laskea monen ajankohdan paras reitti tai tietyn ajanjakson kaikki parhaat yhteydet. Mahdolliset lähtöajat määräytyvät joukkoliikenteen lähtöaikojen mukaan. Vastus on seuraavien tekijöiden summa minuutteina: liityntäaika lähtöpaikassa (access time), ajoaika, vaihtokävelyaika, odotusaika vaihtopaikassa, liityntäaika määräpaikassa (egress time) sekä vaihtojen määrä kerrottuna vaihtamisen painokertoimella. Menetelmällä on mahdollista etsiä myös paras reittivaihtoehto erikseen jokaiselle sallitulle määrälle vaihtoja.

Kun mahdolliset reittivaihtoehdot on valittu, matkustajat jaetaan näiden välille. Tässä vaiheessa lasketaan varsinainen matkavastus, joka muodostuu matka-ajasta, matkan hinnasta sekä liian aikaisen tai liian myöhäisen matkan sanktioista painokertoimineen. Visumissa on perinteisen logittimallin lisäksi käytössä useita eri valintamalleja, jotka

laskevat matkustajien jakautumisen eri reittivaihtoehtoilta matkavastusten perusteella. Valintamallissa voidaan käyttää myös kapasiteettirajoitusta, jolloin reitin matkavastus kasvaa vuoron kuormituksen lisääntyessä. Kapasiteettirajoitus ei estä matkustajamäärien kasvua yli linjan kapasiteetin, mutta sillä voidaan mallintaa ruuhkaisuuden matkustajille aiheuttamaa epämukavuutta vastusta kasvattamalla. Tällaista kapasiteetin huomioivaa laskentaa ei ole Emmen aikataulusijoittelualgoritmissa.

Visumin sijoittelussa on käytössä myös muita ominaisuuksia, joita Emmen aikataulusijoittelussa ei ole. Esimerkiksi laskennassa on mahdollista painottaa vaihtoodotusta siten, että määritellään tietty optimaalinen vaihto aika, josta poikkeamisesta algoritmi sakottaa sen mukaan, mitä suurempi poikkeama on. Emmen sijoittelussa käytetään aina samaa painokerrointa odotusajan pituudesta riippumatta. Lisäksi Visumissa matkan alkuodotusta voidaan arvioida funktiolla, joka perustuu joukkoliikenteen vuoroväleihin tai aikatauluihin, mikä kuvaa satunnaista pysäkillä saapumista. Emmen aikataulusijoittelussa taas oletetaan aina matkustajan tuntevan joukkoliikenteen aikataulut ja ajoittavan saapumisensa niiden mukaan, ja saapumisaikaan lisätään sijoitteluparametrina määriteltävä minimiodotusaika, joka voi olla solmu- ja linjakohtainen.

### **3.4.3 Muita makromalleja**

Myös muissa liikennemalliohjelmissa on mahdollisuus aikataulupohjaisiin tarkasteluihin. Esimerkiksi Citilabsin kehittämä Cube Voyager sekä Caliperin Transcad lupaavat mahdollisuuksia aikataulutiedon käsittelyyn. Nuzzolo ja Crisalli (2009) listasivat myös Omnitransin aikataulusijoitteluohjelmien yhteydessä, mutta yhtiön materiaaleissa puhutaan ainoastaan vuoroväli pohjaisesta joukkoliikenteen kuvauksesta. (Caliper 2009, Citilabs 2013, Omnitrans 2013)

## **3.5 Muita vaihtoehtoja**

Matrex Oy (Matrex 2002) kehitti Helsingin kaupungin liikennelaitokselle vuonna 2002 Joukkoliikenteen laatumittarin joukkoliikennejärjestelmän laadun arvioimiseksi ja esimerkiksi muutosten vertailua varten. Laatumittari muuntaa Joukkoliikennerekisterin (JORE) linjasto- ja aikataulutiedot Emme-ohjelman ymmärtämään muotoon. Tämän jälkeen sijoitellaan Emmen aikataulupohjaisella sijoittelulla yksi matka minuutissa kunkin osa-alueparin välille. Sijoitteluista saadaan tuloksena matka-ajan, matkavastuksen sekä matkanopeuden keskiarvo ja matkamäärillä painotettu keskiarvo kunkin osa-alueen matkoille. Saatua tuloksia voidaan käyttää esimerkiksi liikennejärjestelmän vuotuisten muutosten tutkimiseen. Tarkastelut tehdään erikseen aamuhuipputunnille, päivä tunnille sekä iltahuipputunnille.

Laatumittarin automaattisesti tuottama joukkoliikenneverkko sisälsi useita päällekkäisiä linkkejä, jolloin linkkien kokonaismäärä ylitti Emmen lisenssikoossa sallitun määrän. Verkkoa oli tarpeen korjata käsityönä, joka vei huomattavasti aikaa. Myös laatumittarin antamia tuloksia oli vaikea tarkastella yksityiskohtaisemmin verkon monimutkaisuudesta johtuen. Näistä syistä laatumittari ei ole käytössä HSL:ssä. (Vatanen 2013)

Liikennejärjestelmän laadun arviointiin HSL-alueella on nykyään käytössä saavutettavuustyökalu SAVU, jonka yhtenä osana on uusi MASA-menetelmä joukkoliikenteen matka-aikasaavutettavuuden laskemiseksi. Saavutettavuutta arvioidaan 250x250-metrin ruudukolla painottamalla joukkoliikenteen matka-aikoja liikkumistarpeiden kohteiden, kuten asukkaiden ja työpaikkojen, määrillä. Saavutettavuuden laskenta perustuu JORE:sta saataviin linjojen keskimääräisiin vuoroväleihin ja matka-aikoihin tarkastelu-

ajankohtana (aamuhuippu-, päivä- ja iltahuipputunti) sekä alueiden maankäyttöön. Menetelmän lopputuloksena muodostetaan saavutettavuusvyöhykkeet, joiden sisällä matka-aikaan perustuva saavutettavuus on yhtä hyvä. Analyysi antaa kuvan siitä, millainen joukkoliikenteen tarjonta kullakin alueella on ja sitä voidaan käyttää myös eri liikennöintikausien tarjonnan vertailuun. Aikataulusuunnittelun työkaluksi MASA ei kuitenkaan sovellu, sillä se ei ota huomioon tarkkoja aikatauluja, vaan ainoastaan keskimääräiset vuorovälit. (HSL 2013c)

HSL:n joukkoliikenteen aikataulusuunnittelussa käytettävään Hastus-ohjelmaan kuuluu myös NetPlan-moduuli, joka ei tällä hetkellä ole HSL:n käytössä. Moduuli määrittää optimaalisen aikataulun, kun siihen antaa lähtötiedoiksi skemaattisen liikenneverkon kuvauksen sekä linjojen vuoromäärät tunnin aikana. Optimointi tapahtuu minimoimalla sakkominuutteja, joita kerryttävät esimerkiksi epäsäännölliset vuorovälit tai tavoittelusta vaihtoajasta poikkeaminen. NetPlan pystyy käyttämään optimoinnissa myös linjojen kuormitustietoja, mutta järjestelmä ei tällä hetkellä osaa käsitellä kokonaisten matkakettujen matkustajamääriä ja vaihtoja. Reittien painottaminen tapahtuu siis määrittelemällä käsin kunkin yhteyden tärkeys. Työkalua kehitetään jatkuvasti, ja myös matkustajamäärien käsittelymahdollisuuksia voidaan laajentaa. NetPlania voisi käyttää aikataulusuunnittelussa ideoinnin apuna, sillä järjestelmä tuottaa ehdotuksen optimaaliseksi aikatauluiksi. NetPlan voisi sopia osaksi iteratiivista prosessia, jossa moduulista saatuja aikatauluja testattaisiin liikennemallilla ja jälleen NetPlanilla muutosten jälkeen. (Räty 2013, Sagdahl 2014)

Yksittäisten matkojen arviointiin soveltuu myös HSL:n Reittiopas ([www.reittiopas.fi](http://www.reittiopas.fi)), jolla voidaan laskea optimaalinen reitti määritellystä alkupisteestä tiettyyn määräpaikkaan haluttuna ajankohtana. Reittiopas perustuu CGI:n (ent. Logican) algoritmiin, joka etsii kävelyverkolta lähimmät joukkoliikenteen pysäkit lähtö- ja määräpaikassa ja hakee näiden välille nopeimpia yhteyksiä. Reittiopas ei kuitenkaan osaa tarkastella useita matkoja tai kohteita kerrallaan, joten sillä voidaan tehdä lähinnä pistokokeita ennalta tärkeiksi tiedettyjen yhteysvälien toimivuudesta. (Honkonen 2013)

HSL tarjoaa lisäksi Matka-aikakartta –palvelua ([mak.hsl.fi](http://mak.hsl.fi)), joka laskee matka-ajan joukkoliikenteellä, kävellen tai pyörällä määritellystä lähtö- tai päätepisteestä muualle seudulle Reittioppaan aikatauludatan perusteella. Lopputuloksena on hieman SAVU-analyysiä vastaavia matka-aikakarttoja, joissa tietyssä ajassa saavutettavat kohteet on esitetty omina vyöhykkeinään. Lähtötietoina voidaan määritellä myös useampi kohde, jolloin tulokartat kertovat pisimmän matka-ajan, joka tiettyyn pisteeseen on mistä tahansa määritellyistä lähtöpaikoista. Karttoihin laskettava matka-aika on painottamaton summa matkan osavaiheista täsmälleen määriteltynä ajankohtana eli tulokset riippuvat valitusta päivämäärästä ja kellonajasta, ja matka-ajan jakautumisesta matkan eri osavaiheiden välillä ei saada tietoa. Toisin kuin SAVU-tarkasteluissa, alueiden saavutettavuutta ei painoteta suhteessa asukas- ja työpaikkamääriin. Matka-aika-kartat soveltuvat tietyn paikan tai paikkojen tarkasteluihin, mutta niiden avulla ei voi muodostaa kokonaiskuvaa joukkoliikenteen toiminnasta tai muutoksista seututasolla. (HSL 2013b)

Helsingin yliopiston Geotieteiden ja maantieteen laitoksen MetropAccess-tutkimushankkeessa on kehitetty saavutettavuuden tutkimista varten Reitin-työkalu. Analyysityökalulla on mahdollista laskea joukkoliikennereittejä, matka-aikoja ja etäisyyksiä eri lähtö- ja kohdepisteiden välillä, sekä lisätä uusia reittejä analyysiin. Reitin käyttää HSL:n tuottamaa Kalkati.net XML-aineistoa voimassa olevista joukkoliikenteen reiteistä ja aikatauluista sekä kevyen liikenteen osalta OpenStreetMap-aineistoa. Joukkoliikenteen reititys perustuu modifioituun Dijkstran algoritmiin. (Saarsalmi et al. 2014)

Reitittimen käyttöohje (Saarsalmi et al. 2014) kuvaa työkalua näin: ”Reititin pystyy optimoimaan tehokkaasti suuren joukon joukkoliikennereittejä ja tuottamaan alueellisissa saavutettavuustarkasteluissa tarvittavaa tietoa esimerkiksi tuhansien lähtöpisteiden ja kymmenien kohdepisteiden välisestä matka-ajasta sekä matkaketjusta eri joukkoliikennevälineillä. Reitittimen reittioptimointia voi muokata erilaisilla parametreilla (esim. lähtökellonaika, kävelynopeuden säätö, vaihdottomuuden suosiminen, tiettyjen joukkoliikennelinjojen tai kulkumuotojen sulkeminen pois käytöstä). Reitittimeen on mahdollista lisätä myös uusia, hypoteettisia joukkoliikennereittejä ja testata näiden vaikutusta matka-aikoihin ja reittivalintoihin eri alueilla. Työkalulla on mahdollista myös vertailla reittejä ja niiden matka-aikoja vanhempien aikataulujen ja reitistöjen välillä.” Reititin käyttää laskennassa melko vastaavanlaisia parametreja kuin HSL:n Emme-malli.

## 4 Joukkoliikenteen suunnittelu HSL-alueella

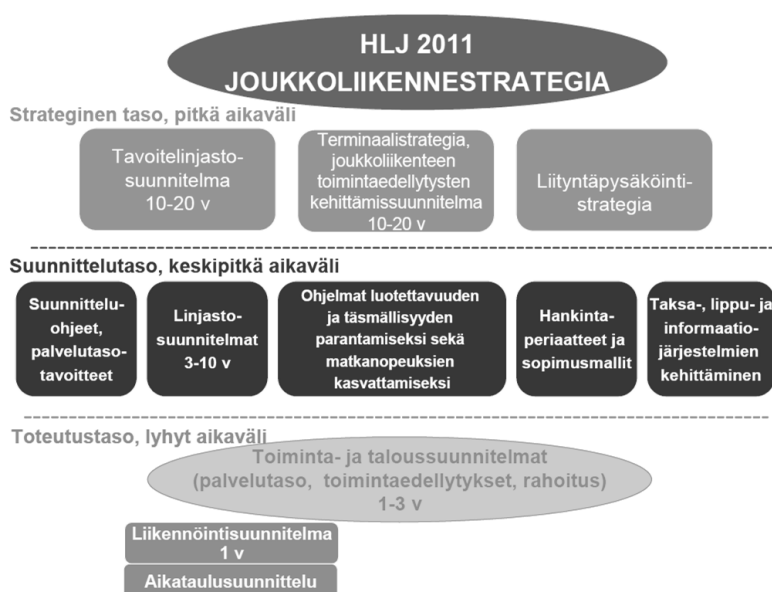
Tässä luvussa kuvataan joukkoliikenteen ja aikataulujen suunnittelun periaatteita ja menetelmiä HSL-alueella. Lisäksi esitellään Helsingin seudun HELMET-liikennemallin toimintaa.

### 4.1 Joukkoliikenteen suunnittelu

Vuodesta 2010 alkaen joukkoliikenteen suunnittelusta ja järjestämisestä pääkaupunkiseudulla on vastannut Helsingin seudun liikenne –kuntayhtymä (HSL). HSL:n jäsenkuntia ovat Helsinki, Espoo, Kauniainen, Vantaa, Kerava, Kirkkonummi ja Sipoo. HSL:n strategisia tavoitteita ovat mm. asiakkaiden sujuvat matkat, selkeä palvelu, kustannustehokkuus sekä joukkoliikenteen suosion kasvattaminen. Näihin tavoitteisiin pyritään mm. kehittämällä joukkoliikenteen suunnitteluperiaatteita ja -työkaluja, missä tämä diplomityö toimii yhtenä osana.

Valtaosa HSL-alueen liikenteestä on kilpailutettu niin kutsutun bruttomallin mukaisesti, jolloin HSL:n omana suunnittelutyönä tehdään luvussa 2.1 kuvatun taulukon 1 vaiheet A-D, kun taas liikennöitsijä suunnittelee kuljettajien työvuorot. Liikennöitsijällä on myös mahdollisuus muokata autokiertoja omaan tuotantoonsa sopivammiksi, kunhan suunnitellut aikataulut ja muut reunaehdot toteutuvat.

Helsingin seudun liikenteen Joukkoliikennestrategiassa (HSL 2010b) joukkoliikenteen suunnittelu on jaettu kolmeen tasoon suunnittelun aikajänteen mukaan (kuva 11). Strategisen tason suunnitelmat ajoittuvat yleensä vähintään 10 – 20 vuoden päähän. Linjastosuunnittelua tehdään enimmäkseen projektiluontoisesti suuremmille aluekokonaisuuksille kerrallaan sekä pienemmässä mittakaavassa myös jatkuvana kehitystyönä. Näissä aikajänne on 1 – 10 vuotta. Aikataulut taas suunnitellaan vuosittain keväisin tulevaksi kesäksi ja talvikaudeksi. Aikataulusuunnittelun yhteydessä mm. tarkistetaan ajoaikojen riittävyys, linjojen kuormitus sekä aikataulujen toimivuus suhteessa suunnittelun eri sidonnaisuuksiin maankäytön, liikenteen, matkustajamäärien ja ajonopeuksien muuttuessa. Aikataulujen suunnittelua on kuvattu tarkemmin seuraavassa luvussa.



Kuva 11. Joukkoliikenteen suunnittelutasot HSL:ssä (HSL 2010b).



## 4.2 Aikataulujen suunnittelu

Joukkoliikenteen palvelutason, reittien ja vuorotarjonnan määrittelyn jälkeen viimeinen työvaihe HSL:n joukkoliikennesuunnittelussa on aikataulusuunnittelu, joka viime kädessä määrittää matkustajille tarjottavan palvelun. Etenkin harvemmin kulkevilla linjoilla myös aikataulusuunnittelu on matka-aikojen kannalta merkittävää, sillä se määrittää yhteensopivuuden mm. työvuorojen, koulujen alkamisaikojen sekä juna- ja metrovuorojen kanssa. Tiheämmän tarjonnan alueilla voidaan ajatella, että yksittäisen vuoron aikatauluilla ei ole niin suurta merkitystä, sillä keskimääräiset odotusajat ovat pieniä. Toisaalta tiheimmät vuorovälit perustuvat yleensä suurempaan matkustuskysyntään, joten voidaan ajatella, että näitä aikatauluja kehittämällä voisi parantaa suuremman joukon matkustamista. (Elfström et al. 2013)

HSL:n suunnitteluperiaatteita on kuvattu julkaisussa Joukkoliikenteen suunnitteluohje HSL-liikenteessä (Räty et al. 2012). Ohje on laadittu joukkoliikennelain mukaiseksi palvelutasomäärittelyksi HSL-alueella, ja siinä kuvataan myös mm. tavoitteellista linjastorakennetta sekä annetaan suuntaviivoja aikataulusuunnitteluun.

Vuorovälien osalta suunnitteluohjeessa todetaan, että niiden on vastattava kysyntää sekä määriteltäviä palvelutasotavoitteita. Aikatauluissa pyritään mahdollisuuksien mukaan vakiominuuttisiin aikatauluihin, jotka ovat matkustajille helpompi muistaa ja myös helpompia viestiä. Yhteisiä osuuksia palvelevien linjojen aikataulut pyritään sovittamaan toisiinsa tasaisen vuorovälin saavuttamiseksi, ja yhteinen vuoroväli ei saa poiketa yli 50 % keskimääräisestä vuorovälistä ilman perusteltua syytä, kuten työvuorot tai kouluajat. Liityntäliikenteen vuorovälit on sovittava yhteen runkoliikenteen kanssa vaihtojen helpottamiseksi.

Ajoaikojen täsmällisyyttä parannetaan ajantasauspysäkeillä, joita tulisi HSL:n suunnitteluohjeen mukaan sijoittaa linjan reitille noin 15-20 minuutin ajoajan välein. Ajantasaukset pyritään sijoittamaan liityntäasemien tai vaihtopaikkojen yhteyteen. Aikataulujen luotettavuutta pyritään parantamaan myös sillä, että autokierrossa lähtöjen väliin jätetään riittävä elpymisaika. Pienissä liikennöintikokonaisuuksissa voidaan huomioida autokiertojen suunnittelussa myös kuljettajien taukoja, jolloin vuoroväli voi tilapäisesti olla yhtä palvelutasoluokkaa alempi.

Aikataulut suunnitellaan HSL:ssä Hastus-ohjelmalla, jossa suunnitellaan ensin ATP-moduulilla reittien ajoajat ja sitten Vehicle-moduulilla autokierrot. Ajoaikojen ja ajoajan hajonnan määrittely perustuu matkakorttijärjestelmästä saataviin mittaustietoihin toteutuneista ajoajoista. Helmi –informaatio- ja etuusjärjestelmään kuuluvilla linjoilla saadaan ajoaikadataa myös tästä järjestelmästä, ja GPS-mittauksiin perustuvaa dataa on myös otettu äskettäin käyttöön aikataulusuunnittelussa. Ajoajat suunnitellaan erikseen kesä- ja talviliikenteeseen, ja ajoajat vaihtelevat päivätyypin sekä vuorokaudenajan mukaan. Pääsääntöisesti pisimmät ajoajat ovat talven ruuhkaliikenteessä, kun taas kesäliikenne on nopeampaa.

Sara Lukkarinen tutki diplomityössään (2012), millä suunnittelukriteereillä saavutettaisiin matkustajien kannalta parhaat ajoajat HSL-alueella. Diplomityön johtopäätöksenä suositellaan, että linjan ajoaika suunnitellaan pääsääntöisesti siten, että etuajassa ajavia lähtöjä on korkeintaan 40 %. Pienen ajoakahajonnan linjoilla voidaan käyttää myös keskiarvoa tai mediaania. Reitin eri osilla voidaan lisäksi mahdollisesti käyttää eri ajoaikojen muodostamisperiaatteita linjan luonteesta ja kuormittumisesta riippuen. Esimerkiksi kohdassa, jossa suurin osa matkustajista on jo noussut linjan kyytiin, voidaan sallia enemmän etuajassa ajamista ilman, että se vaikuttaa matkustajapalveluun. Tällä voi-

daan myös vähentää kuljettajalle lyhyistä ajoajoista aiheutuvaa painetta. Linjan elpymisaika suunnitellaan siten, että 95 % vuoroista ehtii päätepysäkillä määritellyn ajoajan ja elpymisajan sisällä. Loput 5 % ajoajoista ovat esimerkiksi poikkeuksellisten olosuhteiden tai mittausvirheiden takia pidempiä, eikä näiden huomioiminen elpymisajassa ole kustannustehokkuustavoitteen takia järkevää.

Ajoaikojen muodostamisen jälkeen suunnitellaan linjojen kaaviot eli autokierrot kohteittain. Kaaviosuunnittelussa määritellään mm. kunkin linjan lähtöajat, mahdolliset ajantasausajat, elpymisajat sekä autojen kierrätys linjalta toiselle. Tässä noudatetaan aiemmin mainitun HSL:n suunnitteluohjeen tavoitteita sekä pyritään ottamaan huomioon mm. matkustajilta ja liikennöitsijältä saatua palautetta. Suunnittelua ohjaa merkittävästi myös jäsenkuntien taloustilanne, joka viime kädessä määrittää, millaisia ratkaisuja on mahdollista tehdä. Aikataulujen suunnittelussa moni asia vaikuttaa toisiinsa, ja esimerkiksi tasaisista lähtöajoista voidaan joutua tinkimään, jotta liikenne toimisi käytettävissä olevalla automäärällä. Suunnittelu on kokonaisuuden optimointia, jossa pyritään löytämään mahdollisimman tehokas ja taloudellinen ratkaisu annettujen rajoitteiden ja toiveiden puitteissa.

Aikataulusuunnittelussa käytetään Hastus-ohjelmaa, jonka avulla voidaan automatisoida ajoaikojen laskenta määriteltyjen parametrien mukaisesti. Hastuksella voidaan myös optimoida kalustokiertoa, jolloin suunnitellut aikataulut pystytään toteuttamaan mahdollisimman pienellä kalustomäärällä eli mahdollisimman tehokkaasti. Lisäksi ohjelma helpottaa vakiominuuttisuuden ja tasavälisyyden toteuttamista. HSL:llä ei kuitenkaan tällä hetkellä ole käytössä kovin tehokkaita työkaluja mm. vaihtojen synkronointiin, vaan tunnetut tärkeät vaihtoyhteydet sovitetaan käsityönä. Tältä diplomityöltä toivotaan apua tähän työvaiheeseen.

Kaavioiden suunnitteluun ei myöskään ole olemassa eksakteja ohjeita samaan tapaan kuin ajoaikojen suunnitteluun, ja työskentely perustuu pitkälti suunnittelijan kokemukseen ja tietämykseen. Yksiselitteisiä ohjeita suunnitteluun on hyvin vaikeaa muodostaa, sillä erityyppisillä linjoilla on erilaisia vaatimuksia aikatauluille. Pääsääntöisesti voidaan todeta, että tiheän vuorotarjonnan yhteysväleillä tärkeintä on tasata vuorovälejä, jolloin satunnaisesti saapuvan matkustajan odotusaika on lyhyt eikä aikatauluja tarvitse tietää. Harvemmin kulkevilla linjoilla sen sijaan on erityisen tärkeää sovittaa suunnittelutavan linjan aikataulut siten, että liitännät toimivat ja aikataulut sopivat mm. koulujen ja työpaikkojen alkamis- ja päättymisaikoihin. Vaihdot kannattaa suunnitella siten, että ne vaihtoyhteydet, joissa suurimmat matkustajavirratt kulkevat, olisivat sujuvimpia. (Elfström et al. 2013)

HSL:n joukkoliikennesuunnittelijat (Elfström et al. 2013) ideoivat haastatteluissa tätä diplomityötä varten aikataulusuunnittelun kehittämiskohteita, joihin kaivattaisiin uusia työkaluja. Aikataulusuunnittelun tueksi toivottiin menetelmää, jolla voisi objektiivisemmin arvioida aikataulumuutosten vaikutuksia sekä aikataulujen hyvyttä matkustajanäkökulmasta. Tällä hetkellä aikataulujen sovittaminen toisiinsa (vaihdot, tasavälistys) ja ulkoisiin sidonnaisuuksiin (koulut, työpaikat) tehdään käsityönä, ja tuotantoon otettavan aikatauluvaihtoehdon valinta perustuu suunnittelijan näkemykseen.

Haastatteluissa usein mainittuja tapauksia olivat mm. vaihtojen priorisointi, (juna)vaihtoyhteyksien ja muun bussiliikenteen keskinäinen priorisointi, vakiominuuttisuuden ja täsmävuorojen etujen arviointi sekä tahdistettavan reittiosuuden valinta. Lisäksi esitettiin toiveita mm. linjastosuunnitelmien laatimisen, aikatauluharvennusten, vuorovälien vaihtumiskohtien ja ruuhkapiikin tarjonnan suunnittelun tueksi. Myös aikataulujen toteutumisen seurannan sekä aikataulujen visualisoinnin kehittämistä toivottiin.

### 4.3 HSL:n HELMET-malli

Tässä luvussa on selostettu lyhyesti Helsingin seudun työssäkäyntialueen henkilöliikenteen kysyntämallien (HELMET) pääkaupunkiseudun mallin laatimista ja rakennetta erityisesti Helsingin seudun 14 kunnan osalta. Mallia käytetään mm. liikennejärjestelmäsuunnittelussa, kuten määrävuosin laadittavassa Helsingin seudun liikennejärjestelmäsuunnitelmassa (HLJ), sekä joukkoliikenteen linjastosuunnitelmien, kuten Länsimetron liityntälinjaston, laadinnassa ja vaikutusten arvioinnissa. Luvun teksti perustuu pääosin julkaisuun Helsingin seudun työssäkäyntialueen liikenne-ennustemallit 2010 (Elo-lähde et al. 2011), jossa on kuvattu tarkemmin mallityötä.

Uusi ennustejärjestelmä laadittiin, sillä työssäkäyntialueen laajentumisen myötä YTV:n vanhat, vain pääkaupunkiseudun neljän kunnan asukkaiden käyttäytymistä kuvaavat mallit eivät enää riittäneet. Ennustejärjestelmään ja laadittuun mallistoon sisältyvät nyt koko työssäkäyntialueen kattavan liikennejärjestelmämallin eli tarjontamallin lisäksi erilliset Helsingin seudun 14 kuntaa, ympäryskunnat ja ulkoisen liikenteen kattavat kysyntämallit, jotka poikkeavat toisistaan mm. tarkasteltavien kulkutapojen ja matkaryhmien osalta. Mallistoon kuuluu lisäksi autonomistusta, henkilöauton keskikuormitusta, huipputuntiosuuksia ym. kuvaavia apumalleja. Ennustejärjestelmä toimii Emme-liikennesuunnitteluohjelmistossa ja on rakenteeltaan perinteisen neliporrasmallin kaltainen (kuva 4). Kysynnän ennustaminen eli matkatuotosten, matkojen suuntautumisen ja kulkutavan laskenta tehdään Emmen ennustepankissa ja verkkojen kuormitus sijoittelu-pankissa.

Mallityön pohjana käytettiin syksyinä 2007 ja 2008 toteutettua Helsingin seudun työssäkäyntialueen laajaa liikennetutkimusta (LITU 2008) (HSL 2010a) ja erityisesti siihen kuuluvia liikkumistutkimuksia (HEHA 2007 ja 2008) (HSL 2010c). Syksyllä 2012 Helsingin seudulla tehtiin uusi liikkumistutkimus (HEHA 2012) (HSL 2013a), jonka aineistoa yhdessä aiemmin kerätyn aineiston kanssa on käytetty HELMET-mallien päivittämiseen versioksi 2.1. Mallin päivytystyöstä ei ole vielä julkaistu raporttia, mutta uuden version rakenne ja periaatteet ovat pitkälti samat kuin aiemminkin, joten tässä tekstissä on keskitytty kuvamaan vuonna 2010 laaditun mallin ominaisuuksia.

Helsingin seudun mallin tuotosluvut määräytyvät henkilöauton käyttömahdollisuuden ja ikäryhmän perusteella. Lisäksi tuotosmallin lähtöaineistona käytetään ennustealueiden väestö- ja työpaikkamäärätietoja. Matkat jaetaan mallissa kotiperäisiin, työperäisiin ja muihin kuin koti- tai työperäisiin matkoihin. Kotiperäiset matkat jakautuvat edelleen neljään ryhmään: työ- ja opiskelumatkoihin, koulumatkoihin, ostos- ja asiointimatkoihin sekä muihin matkoihin. Ensin lasketaan kunkin alueen asukkaiden synnyttämien matkojen määrä matkaryhmittäin eri ajankohtina ryhmittäisten tuotoslukujen avulla. Matkojen lähtöpaikat määritetään kotiperäisten matkojen osalta taulukoilla, joihin on listattu, kuinka suurella osalla kunkin alueen generoimista matkoista koti onkin määräpaikkana. Työperäisten matkojen lähtöpaikat määritetään laskemalla ensin työperäisten matkojen kokonaistuotos seututasolla ja jakamalla tämä kokonaistuotos ennustealueille kotiperäisten työmatkojen suhteessa. Muiden kuin koti- tai työperäisten matkojen lähtöpaikat määritetään erikseen kullekin aikajaksolle alueen asukkaiden ja työpaikkojen tuottamien matkojen sekä henkilöauton käyttömahdollisuuden perusteella.

HELMETin kulkutapa- ja suuntautumismallit ovat rakenteeltaan pääsääntöisesti logittimalleja. Mallien estimoinnissa käytettiin HEHA 2008:n lisäksi joukkoliikennematkojen valintaperusteista otosta, jotta saatiin tarkempaa tietoa joukkoliikenteen käyttäjistä. Saadut muuttujat ja kertoimet perustuvat lukuisiin estimointikokeiluihin. Suuntautumista eli määräpaikan valintaa selitetään määräpaikan maankäyttöä kuvaavilla kokotekijöil-

lä ja kulkutavanvalintamallin nimittäjästä saatavalla ns. logsum-muuttujalla, joka kuvaa alueparien välisten matkojen epämukavuutta eri kulkutavoilla. Taulukossa 3 taas on kuvattu kotiperäisten matkojen kulkutapamallissa käytetyt muuttujat. Esimerkiksi pääkaupunkiseudun kotiperäisten työ- ja opiskelumatkojen kulkutapamallin muuttujan painotettu kokonaismatka-aika (JL) kerroin on -0,03716 ja autojen määrän / ruokakunta alueella keskimäärin (HA) kerroin on 1,827.

Taulukko 3. Kotiperäisten matkojen kulkutapamallissa käytetyt muuttujat (Elolähde et al. 2011).

Muuttujat eri matkaryhmien malleissa, kotiperäiset matkat		Kotiperäiset työ- ja opiskelu- matkat		Kotiperäiset muut matkat + ostos- ja asiointimatkat	
		PKS	KEHYS	PKS	KEHYS
Kulkutavanvalintamalli	Ln(etäisyys+1), km (KL)	x	x	x	x
	Matka-aika, min (HA)	x	x	x	
	Painotettu kokonaismatka-aika, "min" (JL)	x	x	x	x
	Ajokustannukset, euroa (HA)	x		x	
	Kustannukset, euroa (JL)	x	x	x	x
	Pysäköintikustannukset, euroa (HA)	x		x	x
	Ajokustannukset + pysäköintikustannukset, e (HA)		x		
	Yleistetty matkavastus, "euroa" (HA)				x
	Vaihtojen määrä, kpl (JL)				
	Autoa / ruokakunta alueella keskimäärin (HA)	x	x	x	x
	Vaihtoehtokohtainen vakio (binäärimuuttuja) (KL)	x	x	x	x
	Vaihtoehtokohtainen vakio (binäärimuuttuja) (HA)	x	x	x	x

Sijoittelemalla kysyntämatriisit eli kuormittamalla liikennejärjestelmää saadaan liikennemääriin perustuvat matka-ajat auto- ja joukkoliikenteelle, ja saatuja matka-aikoja käytetään yhdessä etäisyyksien kanssa sijoittelun ns. yleistettynä matkavastuksena. Sijoittelun tuloksena saadaan mm. liikennemäärät ja nopeudet linkeittäin sekä matka-ajat aluepareittain. Ennuste- ja sijoitteluvaiheita toistetaan, kunnes tulos tasaantuu, eivätkä matka-ajat enää vaihtelee kierrosten välillä.

HELMET-mallissa joukkoliikenteen ajoajat lasketaan funktioilla, jotka perustuvat ajoneuvoliikenteen sijoittelusta saataviin matka-aikoihin. Funktion valinta riippuu siitä, onko joukkoliikenteellä oma kaistansa (ft2) vai ajetaanko muiden ajoneuvojen seassa (ft1). Joukkoliikenteen matka-aikafunktiot ovat

$$ft1 = us2 * length + timau \quad (9)$$

$$ft2 = us2 * length \quad (10)$$

missä:

us2 = segmentikohtaisesti määriteltävä kerroin

length = segmentin pituus

timau = ajoneuvoliikenteen matka-aika segmentillä.

Bussikaistattomilla väylillä joukkoliikenteen nopeus perustuu ajoneuvoliikenteen liikennetilanteen mukaiseen nopeuteen, kun taas bussikaistallisilla väylillä joukkoliikenteen nopeus perustuu vapaaseen nopeuteen väylällä. Bussiliikenteen viivekertoimina käytetään mallissa yleistettyjä arvoja, jotka määritellään väylätyypin perusteella. Sekaliikenteessä oletetaan, että ajoneuvoliikenteen nopeus on 1,5-kertainen bussiliikenteen nopeuteen verrattuna. Bussikaistallisilla väylillä vastaava kerroin vaihtelee välillä 1,5 – 1,7. Malliraportissa todetaan, että nopeuksien suhde voi todellisuudessa vaihdella väyläkohtaisesti, joten mallintamisessa käytetty yleinen kerroin ei anna nopeuksista täysin oikeaa kuvaa.

Matkan eri tekijöitä painotetaan joukkoliikenteen sijoittelussa vastaavilla kertoimilla kuin luvussa 2.2 esiteltyt matkavastuskertoimet. HSL:n liikennejärjestelmämallin sijoitteluparametrit on kuvattu taulukossa 4. Ne vastaavat pitkälti Ojalan ja Pursulan (1994) taulukoimia arvoja. Perinteinen vuorovälipohjainen sijoittelumalli ei osaa huomioida odotteluaikaa, ja ajoajan painokerroin on aina yksi, jotta malli ei tuottaisi epäloogisia tuloksia. Kävelyajan paino on mallissa nimellä auxiliary transit time weight. Odotusaikaa kuvaavat odotusaikakerroin (wait time factor), jolla määritetään odotusajan osuus keskimääräisestä vuorovälistä, sekä odotusajan paino (wait time weight). Vaihtamisen vastus näkyy sijoitteluparametreissa nousuvastuksen (boarding time) ja liikennevälineeseen nousun painokertoimen (boarding time weight) tulona.

Taulukko 4. HSL:n liikennejärjestelmämallin sijoitteluparametrit 2011 (Elolähde et al. 2011, s. 59 ja 61).

	Parametrin arvo
Kävelyajan paino	1,5
Nousun painokerroin	1
Odotusajan paino	1,5
Nousuvastus	
Bussi	$\min[10; 1,5 * \text{neliöjuuri}(\text{linjapituus}) + 1,0]$
Metro, juna	1
Raitiovaunu	1
Odotusaikakerroin sama koko verkolle	1 (kyllä)
Odotusaikakerroin	0,3

Mallin laatiminen on tasapainoilua ennusteiden lähtötietojen sekä niiden tietotarpeiden välillä, joita suunnittelutyössä esiintyy. Nykyisessä HELMET-mallissa ennustealueita on 267, joista pääkaupunkiseudun neljän kunnan alueella 150. Jo näin karkealla aluejako on vaikea saada nykyisillä tutkimusmenetelmillä riittävän tarkkaa lähtödataa mallin estimointia varten, sillä aineiston kerääminen vaatisi huomattavan suuren otoskoon. (Elolähde 2013)

Liikennejärjestelmäsuunnittelussa ja etenkin linjasto- ja aikataulusuunnittelussa olisi kuitenkin hyötyä huomattavasti tarkemmastakin aineistosta. Tämän vuoksi ennustealueittain muodostettuja ennusteita jaetaan pienempiin osa-alueisiin eli sijoittelualueisiin sijoittelutyövaihetta varten. Ennustealuejako muodostettu kysyntä hajotetaan sijoittelualueille jakoluvuilla, jotka perustuvat osa-alueiden asukas- ja työpaikkamääriin. HELMET-mallissa on yhteensä 1056 sijoittelualuetta, joista pääkaupunkiseudun neljän kunnan alueella 611. Tämä tarkempi aluejako mahdollistaa alueellisten muutosten paremman huomioinnin esimerkiksi joukkoliikenteen tarjonnassa. (Elolähde 2013)

Mallista saataviin tietoihin tulee kuitenkin suhtautua kriittisesti, sillä liikenteen sijoittelussa on monia mahdollisia virhelähteitä etenkin, kun tuloksia tarkastellaan yksityiskohdalla tasolla. Tuloksiin voivat vaikuttaa mm. ennustetut matkatuotokset, liikenneverkon kuvaus mallissa sekä käytetty sijoittelualgoritmi ja sen parametrit. Esimerkiksi syöttöpisteiden sijainti sekä käytetyt nousuvastukset eri liikennemuodoille voivat muuttaa sijoittelutuloksia. (Elolähde 2013) Joukkoliikennejärjestelmän kuvauksen vaikutuksia sijoittelutuloksiin on kuvattu tarkemmin Taina Haapamäen diplomityössä Liikennejärjestelmän Emme-kuvauksen kehittäminen joukkoliikennesuunnittelun tueksi (Haapamäki 2010). Pääsääntöisesti vuorovälipohjainen sijoittelu sopii hyvin vaihtoehtojen vertailuun ja muutoksen suunnan ennustamiseen, mutta ei yksittäisten linjojen tarkasteluun.

## 5 Tutkimusmenetelmät ja käytetty aineisto

Diplomityön tavoitteena oli selvittää liikennemallien käyttökelpoisuutta joukkoliikenteen aikataulusuunnittelun apuvälineenä eli tutkia, millaisia keinoja ja työkaluja aikataulusuunnitteluun on käytettävissä, sekä millaisia tuloksia liikennemalleilla voi saada.

Aiemmissa luvuissa on kuvattu kirjallisuuden pohjalta aikataulusuunnittelun periaatteita sekä aikataulupohjaisia liikennemalleja ja niiden sovelluskohteita. Diplomityötä varten oli tarpeen selvittää laajemmin, millaisia suunnittelumenetelmiä muilla alan toimijoilla on käytössä, joten eurooppalaisia suunnittelukäytäntöjä selvitettiin sähköpostikyselyn avulla.

Liikennemallien osalta tavoitteena oli tutkia, miten hyvin aikataulusijoittelun antamat tulokset vastaavat todellisuutta, ja miten eri tekijät vaikuttavat tuloksiin. Myös ohjelmien toimintaan ja käytettävyyteen haluttiin kiinnittää huomiota. Mallien ominaisuuksia tutkittiin kirjallisuusaineiston lisäksi haastattelemalla asiantuntijoita sekä tekemällä erilaisia käytännön tarkasteluja Emme-ohjelmistolla.

### 5.1 Kyselytutkimus

Diplomityötä varten haluttiin selvittää, millaisia suunnittelukäytäntöjä ja –työkaluja muissa suurissa joukkoliikenneorganisaatioissa on. Tämän tyyppistä aineistoa ei kirjallisuudesta löytynyt, joten tehtiin kyselytutkimus eri organisaatioille. Kyselylomake muodostui kolmesta eri aihepiirin avoimesta kysymyksestä, joissa käsiteltiin viranomaisen ja liikennöitsijöiden välistä työnjakoa, aikataulujen suunnittelua ja työkaluja sekä liikennemalleja. Karhukirjeen yhteydessä kyselyyn lisättiin vielä liikennemalleja tarkemmin käsittelevä neljäs kysymys.

Tutkimuslomake lähetettiin eurooppalaisille joukkoliikenneviranomaisille sekä European Metropolitan Transport Authorities –järjestön (EMTA) että Benchmarking in European Service of Public Transport –verkoston (BEST) kautta. EMTA:an kuuluu Helsingin lisäksi 25 Euroopan kaupunkia ja BEST:iin kuusi kaupunkia, joista kaksi ei ole EMTA:n jäseniä. Lisäksi suomenkielinen kyselylomake lähetettiin Turun ja Tampereen kaupunkien joukkoliikenneviranomaisille. Yhteensä kysely lähetettiin siis 29 kaupunkiin. Kysely toteutettiin lokakuussa 2013 ja vastausaikaa annettiin kuukausi. Karhukirjeen yhteydessä vastausaikaa jatkettiin vielä viikolla.

Menettely tuotti yhteensä 17 vastausta 14 maasta, eli vastausprosentti oli 59 %. Tällaista vastausmäärää voidaan pitää varsin onnistuneena. Kaikki vastaajat eivät kuitenkaan vastanneet kaikkiin kysymyksiin ja etenkin karhukirjeen yhteydessä lisätyn neljännen kysymyksen vastausmäärä jäi pieneksi (7 kpl). Myös kyselyn muotoilu vaikutti saatujen tulosten laatuun, ja vastauksista oli havaittavissa, että osa vastaajista oli tulkinnut kysymykset eri tavalla kuin oli tarkoitus. Tämän vuoksi aineistosta ei saatu niin tarkkoja tuloksia, kuin oli toivottu, vaan tulokset joudutaan esittämään yleisemmällä tasolla, jotta ne ovat vertailukelpoisia. Kyselyn tuloksia on kuvattu luvussa 6.1.

### 5.2 Haastattelututkimus

Visum-ohjelman käyttökokemuksia kerättiin haastattelemalla Tampereen seudulla ohjelman kanssa työskennelleitä Hanna Kalenojaa ja Markus Pajarretta. Haastattelun tavoitteena oli selvittää, millaisia eroavaisuuksia ja etuja Visum-ohjelmalla voisi olla Emmeen verrattuna, sekä millaisia käyttökokemuksia ohjelmasta on. Tutkimus toteutettiin teemahaastatteluna kesäkuussa 2014, ja sen tuloksia on kuvattu luvussa 6.2.

### 5.3 Liikennemallitutkimus

Liikennemallitutkimusten tarkoituksena oli selvittää, miten aikataulusijoittelu toimii käytännössä ja millaisia tuloksia saadaan. Aikataulusijoittelua on käytetty aiemmin vain vähän, joten kirjallisuusaineistoa käytännön kokemuksista ei ollut saatavissa laajemmin, kuin aiemmin tässä työssä on esitetty.

Liikennemallitutkimukset Emmellä toteutettiin kahdessa osassa. Ensin selvitettiin mallin antamien reittivaihtoehtojen vastaavuutta suunniteltuun liikenteeseen tutkimalla yksittäisten matkojen sijoitteluja ja vertaamalla saatuja tuloksia Reittioppaan laskemiin, suunniteltuihin aikatauluihin perustuviin tuloksiin. Tuloksia analysoitiin kokonaismatka-ajan sekä matka-ajan komponenttien perusteella. Lisäksi selvitettiin, mikä mallin käyttämän ajoajan merkitys tuloksiin on syöttämällä malliin testilinjojen tarkat ajoajat ja vertaamalla tuloksia.

Aluetason tutkimuksissa selvitettiin erilaisten aikataulumuutosten vaikutuksia koko tutkimusalueella vertaamalla matka-aikasummaa ja nousumäärää. Kuormitustietoja ei voitu tutkia, sillä nykyisistä tilastointijärjestelmistä ei saa tietoa ajoneuvosta poistuvista matkustajista, jolloin vertailuaineistoa tarkastelualueen joukkoliikennelinjojen kuormitustiedoista ei ole saatavilla.

Testejä ajettiin sekä mallin laskemilla ajoajoilla että tietyn linjan tarkennetuilla ajoajoilla. Lisäksi tutkittiin kysyntämuutosten vaikutuksia tuloksiin vertaamalla tasaisesti jakautunutta kysyntää Liikkumistutkimuksesta saatuun minuuttikohtaiseen sekä viidelle minuutille tasattuun kysyntään. Myös sijoitteluparametreina käytettävien sallitun etuajan ja myöhästymisen vaikutuksia tutkittiin lyhyesti.

Aluetason liikennemallitutkimuksia oli tarkoitus tehdä Emmen lisäksi myös Visum-ohjelmalla, mutta ohjelman käyttö osoittautui haastavammaksi kuin oli alun perin ajateltu, minkä vuoksi käytännön testit ohjelmalla jouduttiin rajaamaan tämän diplomityön ulkopuolelle. Ohjelman ominaisuuksia selvitettiin kuitenkin aiemmin kuvatun kirjallisuustutkimuksen avulla sekä haastatteleamalla ohjelmaa käyttäneitä henkilöitä.

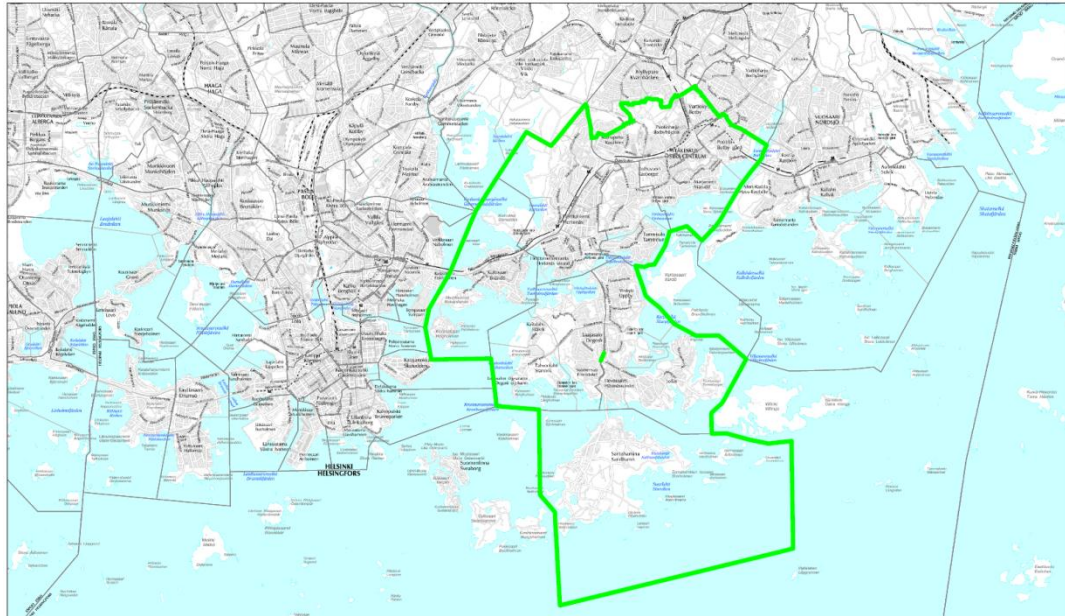
Wallin (2013) suositteli myös Transcadin aikataulusijoittelua tarkasteltavaksi mallin kattavan paikkatietointegraation vuoksi, jonka avulla liikennejärjestelmä voidaan kuvata tarkemmin kuin perinteisissä malleissa. Transcadia ei kuitenkaan saatu kokeilukäyttöön diplomityötä varten. Muista ohjelmista taas ei ole Suomessa käyttökokemuksia, minkä vuoksi ne rajattiin diplomityön tarkastelun ulkopuolelle.

#### 5.3.1 Lähtöaineisto

Mallitarkastelujen lähtökohdaksi otettiin HSL:n HELMET-mallin liikenneverkon ja joukkoliikennelinjaston kuvaukset aamuhuipputunnissa syksyllä 2013. Tarjonta eli joukkoliikennelinjat ja -aikataulut kuvattiin malliin aikavälille 6.00–10.30 tutkimusalueilta.

Yksittäisten yhteysvälien vertailussa sijoiteltiin tunnin jokaiselle minuutille yksi matka kullekin tutkittavalle yhteysvälille ja vertailtiin saatuja tuloksia Reittioppaan antamiin suosituksiin. Ensimmäiset testit toteutettiin yhteysvälillä Laajasalosta Helsingin keskustaan. Näiden testien perusteella mallin ja Reittioppaan tarjoamien yhteyksien välillä oli ajoajoissa merkittävästi eroa. Tämän vuoksi muut tutkittavat yhteydet pyrittiin valitsemaan siten, että tuloksissa näkyisi eripituisia linjoja, jotta eroavaisuudet ajoajoissa kävisivät selkeästi ilmi. Tutkimuskohteiksi valittiin Latokaski-Meilähti, Viikki-keskusta, Maunula-Hakaniemi, Vuosaari-Meilähti sekä Lauttasaari-Viikki.

Aluetason testeissä käytettiin tutkimusalueena Laajasaloa ja Itä-Helsinkiä (kuva 12), sillä alue on sopivan pieni ja selkeästi rajattu sekä työn tekijälle ennestään tuttu. Testialueella kulkee 28 HSL:n joukkoliikennelinjaa. Makrotason testeissä tutkittiin erityisesti linjoja 84 sekä 58 ja 58B. Linjat ovat erityyppisiä, ja siksi toivottiin, että niillä voisi tarkastella erilaisia ilmiöitä. Linjalla 84 on metron liityntälinjana voimakas riippuvuus metron aikatauluista, kun taas linjalla 58 on laajan liikennöintialueensa vuoksi paljon erilaisia sidonnaisuuksia.



Kuva 12. Itä-Helsingin tutkimusalue.

Aluetason tutkimuksissa käytettiin HELMET-mallin mukaista aamuhuipputunnin 2013 kysyntää. Mallissa Itä-Helsingin tutkimusalueella tehdään aamuhuipputunnin (klo 7.15–8.14) matkamatriisissa 1198 matkaa. Tämä tunnin kysyntä jaettiin minuuteittain sijoiteltavaksi vuoden 2012 Liikkumistutkimuksesta saadun aineiston perusteella. Perustapauksena käytettiin tasajakoa, jossa jokaiselle minuutille kohdistettiin 1/60 tunnin kysynnästä. Tarkasteluja tehtiin lisäksi tarkalla kysynnällä sekä viiden minuutin jaksoihin tasatulla kysynnällä. Kysyntäjakoa on kuvattu tarkemmin luvussa 8.5 sekä liitteessä 1.

### 5.3.2 Ajoaikojen tarkentaminen

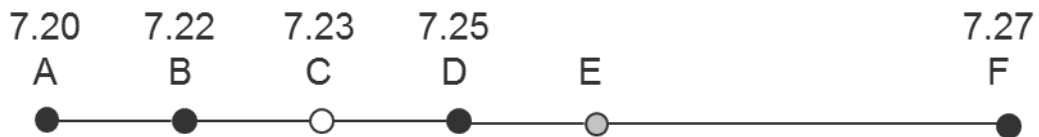
Osa mallitarkasteluista tehtiin linjakuvauksilla, joissa joukkoliikennelinjojen segmentti-kohtaiset ajoajat oli korjattu vastaamaan suunniteltuja. Tässä kappaleessa on kuvattu tarkemmin ajoaikojen tarkennuksessa käytettyjä periaatteita.

Ajoaikojen tarkennus mallissa edellyttää pysäkkien ja mallin solmujen vastaavuuden määrittämistä, jotta pysäkkivälien ajoajat voidaan tallentaa malliin. Tämän jälkeen ajoajat syötetään jokaiselle linjalle pysäkkiväleittäin. Tyypillisesti pysäkkien väliset ajoajat voi kuvata pysäkkiä seuraavalle segmentille, sillä pysäkkien välillä ei voi nousta tai poistua ajoneuvosta. Poikkeustapauksia syntyy, mikäli mallissa ei ole koodattuna kaikkia käytössä olevia pysäkkejä, tai mikäli mallissa on ylimääräisiä pysäkkejä todellisuuteen verrattuna. Näitä tapauksia on havainnollistettu kuvassa 13.

Mikäli mallin kuvauksesta puuttuu jokin käytössä oleva pysäkki, malliin kuvataan sitä ympäröivien pysäkkien välinen ajoaika. Esimerkiksi kuvassa 13 pysäkkiä C ei ole kuvattu malliin, jolloin malliin kuvataan vain pysäkkien B ja D välinen ajoaika kolme minuuttia segmentille B-C.



Etenkin ylimääräisten pysäkkien yhteydessä ajoaikojen koodaamiseen on kiinnitettävä erityistä huomiota, jotta mallissa ei synny epärealistisia tilanteita. Kuvan 13 esimerkissä pysäkki E on kuvattu malliin, vaikka sitä ei todellisuudessa ole. Perustapauksessa pysäkkien D ja F välisen ajoajan voisi kuvata segmentille D-E, koska matkustajat eivät voi nousta tai poistua linjalta ennen pysäkkiä F. Tällöin ajoaika välillä E-F olisi määritelty nolllaksi. Mikäli mallissa kuitenkin on sallittua käyttää myös pysäkkiä E, tämä aiheuttaisi epärealistisen lyhyitä matka-aikoja välille E-F. Tämän vuoksi mallin ylimääräisten pysäkkien yhteydessä ajoaika kannattaa jakaa kaikille todellisten pysäkkien välisille segmenteille esimerkiksi pituuksien suhteessa.



Kuva 13. Esimerkki ajoaikojen kuvauksesta.

Suunnitellut ajoajat pysäkkiväleittäin voivat vaihdella hyvinkin lyhyissä jaksoissa (taulukot 5 ja 6), mikä lisää linjakoodauksen vaatimaa työmäärää sekä tarvittavaa linjasegmenttien määrää. Segmenttien lisääntyminen vaatii jälleen myös lisätilaa tallennukseen, sillä ajoaikojen muuttuminen edellyttää Emmen linjastokuvauksessa uuden linjan perustamisen. Pelkkään lähtöaikojen koodaamiseen verrattuna tarvittava linjojen määrä noin puolitoistakertaistui, mikä kuluttaa huomattavasti käytettävissä olevia segmenttejä, vaikka testatut Laajasalon linjat ovat melko lyhyitä. Seututasolle sovellettuna vastaavanlainen koodaus edellyttäisi käytössä olevan segmenttimäärän eli lisenssikoon kasvattamista, mistä aiheutuu lisäkustannuksia.

Taulukko 5. Linjan 84 talven 2013-2014 ajoajat 1-suunnassa (Herttoniemi – Laajasalo).

Kellonaikaväli	0.00	4.52	6.00	7.30	9.00	11.30	13.30	15.30	18.00	20.30	22.00	22.30	22.52	25.15
Pysäkkiväli	4.51	5.59	7.29	8.59	11.29	13.29	15.29	17.59	20.29	21.59	22.29	22.51	25.14	30.00
1	4	4	5	5	6	6	6	7	6	6	6	6	5	4
2	2	2	2	3	2	3	3	3	3	2	2	2	2	2
3	2	2	2	2	3	2	3	3	3	3	3	2	2	2
4	1	2	2	1	1	2	2	1	2	2	1	1	1	1
Yhteensä	9	10	11	11	12	13	14	14	14	13	12	11	10	9

Taulukko 6. Linjan 84 talven 2013-2014 ajoajat 2-suunnassa (Laajasalo – Herttoniemi).

Kellonaikaväli	0.00	4.00	4.05	5.40	6.15	7.15	8.15	9.45	13.00	17.30	18.00	19.00	19.30	21.00	22.37
Pysäkkiväli	3.59	4.04	5.39	6.14	7.14	8.14	9.44	12.59	17.29	17.59	18.59	19.29	20.59	22.36	30.00
4	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
3	2	2	3	3	3	4	3	3	3	3	2	2	2	2	2
2	1	2	2	2	3	3	3	3	2	2	3	3	2	1	1
1	4	4	4	5	5	7	7	6	7	6	6	5	5	5	4
Yhteensä	9	10	11	12	13	16	15	14	14	13	13	12	11	10	9

Pysäkkivälit: 1 = Herttoniemi (M) – Yliskyläntie, 2 = Yliskyläntie - Lauri Mikonpojan tie, 3 = Lauri Mikonpojan tie – Svanströmintie, 4 = Svanströmintie – Gunillankuja.

### 5.3.3 Sijoitteluparametrit

Emmen aikataulusijoitteluprosessi poikkeaa monilta osin vuorovälipohjaisesta sijoittelusta, minkä vuoksi myös käytettävät parametrit ovat erilaisia. Sopivia parametreja etsittiin kirjallisuudesta, mutta vaikuttaa siltä, että aikataulusijoittelua on toistaiseksi tutkittu ja käytetty vain vähän, joten parametreistakin oli vaikeaa löytää aineistoa. Petja Partanen tutki diplomityössään (2000) aikataulusijoittelualgoritmin toimintaa ja eroavaisuuksia vuorovälisijoitteluun nähden, mutta työn painopisteenä oli pitkämatkaisen liikenteen

tarkastelu, minkä vuoksi käytetyt parametrit ja suositukset eivät sellaisinaan sovellu HSL-alueen liikenteen tutkimiseen.

Suosituksia käytettäväksi parametreiksi pyydettiin Emmen valmistajalta INRO:lta. INRO suositteli säilyttämään matka-aikakomponenttien painokertoimien suhteet samoina kuin vuorovälipohjaisessa sijoittelussa, jotta tulokset olisivat mahdollisimman vastaavia kuin vuorovälisijoittelussa. Kuten aiemmin on mainittu, ajoaikaa ei voi painottaa alle yhdellä, joten muut parametrit on myös pidettävä ennallaan samojen suhteiden säilyttämiseksi. Aikataulusijoittelussa odotusajan painokerroin on kuitenkin aina yksi, mikä muuttaa odotusajan suhdetta muihin matkakomponentteihin. Voisi olla mielekästä säätää myös odotusajan painokerrointa pienemmäksi, mutta odotusajan painottaminen pienemmäksi kuin kävelyn ja ajoajan painot voi aiheuttaa ylimääräistä lenkin kävelyä tai matkustamista joukkoliikennelinjaa odottaessa. INRO:n mukaan on järkevää, että odotusajan painokerroin on aikataulusijoittelussa hieman pienempi, sillä odotusajan kuvaustapakin on eri: vuorovälisijoittelussa käytetään vuoroväliin perustuvaa odotusajan odotusarvoa, kun taas aikataulusijoittelussa odotusaika perustuu täsmällisesti aikatauluihin. INRO suositteli myös sallitun etuajan ja myöhästymisen osalta käyttämään alustavissa tutkimuksissa oletusarvoa eli nollaa. Jatkotutkimuksissa voi tarvittaessa selvittää tarkemmin parametrin vaikutuksia tuloksiin. (INRO 2014)

Yksittäisten yhteysvälien vertailussa Emme-mallin ja Reittioppaan parametrit asetettiin mahdollisimman samanlaisiksi, jotta tulokset saataisiin vastaamaan hyvin toisiaan. Aikataulusijoittelualgoritmissa käytettävä parametri suurin sallittu etuaika/myöhästyminen asetettiin nolaksi, jotta malli tarjoaisi mahdollisimman monta erilaista vaihtoehtoa, kuten Reittiopaskin. Mikäli etuajassa tai myöhässä lähteminen sallitaan, malli ajoittaa kaikki lähdöt nopeimpien vuorojen yhteyteen. Lisäksi kävelynopeutena käytettiin Reittioppaan oletusnopeutta 70 m/min (4,2 km/h). Kooste eri testeissä käytettävistä sijoitteluparametreista on esitetty taulukossa 7.

*Taulukko 7. Aikataulusijoittelutesteissä käytettävät parametrit.*

	Yksittäisten yhteyksien testit	Aluetason testit
Kävelynajan paino	1,5	1,5
Nousun painokerroin	1	1
Ajoajan paino	1	1
Odotusajan paino	1	1
Nousuvastus		
Bussi	min[10;1,5*neliöjuuri(linjanpituus)+1,0]	
Metro, juna	1	1
Raitiovaunu	1	1
Suurin sallittu etuaika (min)	0	0 / 5
Etuaajan painokerroin	0	0
Suurin sallittu myöhästyminen (min)	0	0 / 5
Myöhästymisen painokerroin	0	0
Minimiodotusaika (min) / Reittioppaassa vaihtomarginaali	1	1
Kävelynopeus (km/h)	4,2	5
Testiajankohta	7.00-8.00	7.15-8.15

## 6 Kysely- ja haastattelututkimukset

### 6.1 Aikataulujen suunnittelu muissa kaupungeissa

Diplomityön yhteydessä toteutettiin kyselytutkimus, jonka tarkoituksena oli selvittää, kuinka muissa eurooppalaisissa suurissa kaupungeissa suunnitellaan joukkoliikenteen aikataulukokonaisuutta. Kysely lähetettiin European Metropolitan Transport Authorities –järjestön (EMTA), Benchmarking in European Service of Public Transport –verkoston (BEST) jäsenille sekä Tampereen ja Turun kaupungeille. Kyselyyn saatiin yhteensä 17 vastausta, 14 eri maasta, tosin osa vastauksista käsitti vain osan lomakkeen kysymyksistä. Vastanneet kaupungit ja kaupunkiseudut olivat Amsterdam, Barcelona, Berliini, Birmingham (Centro Area), Budapest, Frankfurt, Kööpenhamina, Lontoo, Oslo, Praha, Rotterdam, Stuttgart, Tukholma, Varsova, Wien sekä Vilna ja lisäksi Suomesta Tampere. Tässä luvussa on esitetty sanallinen yhteenveto tuloksista. Käytetty kyselylomake sekä tarkempi taulukointi tuloksista ovat tämän diplomityön liitteinä.

Vastanneista kaupungeista lähes kaikissa (15 kpl) joukkoliikenneviranomaisen määrittää joukkoliikenteen palvelutason. Yhdessä kaupungissa liikenne on täysin liikennöitsijän suunnittelemaa muutamaa ostovuoroa lukuun ottamatta ja yhdestä kaupungista ei saatu kysymykseen vastausta. Bussiliikenteen linjaston suunnittelee vastanneista kaupungeista lähes 2/3:ssa (11 kpl) joukkoliikenneviranomaisen ja viidessä kaupungissa liikennöitsijä. Ei-vastanneita oli yksi. Aikataulusuunnitteluvastuu puolestaan jakautui vastauksissa suunnilleen tasan viranomaisten ja liikennöitsijöiden välillä.

Liikennöitsijöiden tekemien suunnitelmien laadunvalvontaa käsittelevään kysymykseen vastasi vain noin puolet vastaajista (8 kpl). Kaikissa näissä vastauksissa kerrottiin joukkoliikenneviranomaisen tekemän laadunvalvontaa. Kahdessa tapauksessa valvontaa tehtiin, vaikka sekä linjasto- että aikataulusuunnittelu olivat viranomaisen tehtäviä. Näissä kahdessa vastauksessa laadunvalvontaa käsiteltiin toteutuneen liikenteen kautta, ja ohjattiin laatukannusteilla ja sanktioilla viranomaisen suunnitelmien noudattamiseen. Muutama vastaaja kertoi lisäksi liikennöitsijöiden valvovan myös itse suunnitelmien laatua. Koska neljäsosassa kysymykseen saaduista vastauksista kysymys on tulkittu eri tavalla kuin se alun perin oli tarkoitettu, on mahdollista, että myös muissa vastauksissa ilmenee samanlaista virhettä, joka ei vain käy vastausten sanamuodoista selkeästi ilmi.

Aikataulusuunnittelussa käytettäviä prioriteetteja listattiin monia erilaisia, mutta selvästi yleisin vastaus (6 kaupunkia) oli, että liikenne on niin tiheää, että aikataulujen yhteensovittamiselle ei ole tarvetta. Lisäksi kaksi kaupunkia totesi, että yhteensovittamiselle on vain vähän tarvetta, koska liikenne on niin tiheää, ja yhteensovittamista on tarpeen tehdä vain tiettyjen harvan vuorovälin linjojen kanssa. Monessa kaupungissa mainittiin myös suuren kysynnän suuntien (4 mainintaa), junien (3 kpl) ja runkoverkon (1 kpl) priorisointi. Useimmissa vastauksissa korostui vahvan ja tiheän joukkoliikenneverkon periaate, johon myös HSL:ssä pyritään.

Aikataulujen arvioinnissa käytettävistä työkaluista kertoi kyselytuloksissa vain kuusi vastaajaa, joista kaksi kertoi tekensä arviointia käsityönä ilman erillistä työkalua, ja kahdessa kaupungissa viranomaiset eivät tehneet tällaista arviointia lainkaan. Ainoastaan kaksi käytti arviointiin erillistä ohjelmaa. Työkaluina mainitut ohjelmat olivat AGC Busman sekä Viriato. Yksi vastaaja on ottamassa käyttöön Hastus NetPlan –ohjelman vuonna 2014. Myös muutama muu vastaaja kertoi käyttämistään työkaluista, joita olivat näiden lisäksi Diva, Winbus, PikasGPS sekä HSL:ssäkin käytössä oleva Hastus. Muut

sovellukset ovat Hastusta muistuttavia suunnitteluohjelmia, kun taas PikasGPS:ää käytetään toteutuneen liikenteen arviointiin.

Kukaan vastaajista ei raportoinut käyttävänsä liikennemalleja aikataulujen suunnitteluun, vaikka yksi kaupungeista kertoi käyttävänsä liikennemalliaan myös pienten hankkeiden vaikutusten tutkimiseen. Yksi vastaaja kertoi, että heillä on rakenteilla Visumalli, jota voisi käyttää myös aikataulusuunnitteluun. Yksi vastanneista perusteli, että liikennemalleja ei käytetä aikataulusuunnittelussa, sillä mallin antamat kuormitustiedot ovat liian epäluotettavia antaakseen käyttökelpoisia tuloksia. Ei-vastanneita oli kaksi.

Kyselyvastauksissa ei tullut esille, että vastanneissa maissa olisi käytössä vastaavanlaisia työkaluja tai menetelmiä kuin tässä diplomityössä tutkittava liikennemallien käyttö. Osittain työkalujen vähäisyyttä saattaa selittää monien kaupunkien tiheä liikenne, joka ei edellytä aikataulujen tarkkaa yhteensovittamista. Vastauksista ei kuitenkaan käy ilmi, mitä kukin vastaaja tarkoittaa tiheällä liikenteellä. Lisäksi puolessa vastanneista kaupungeista liikennöitsijät suunnittelevat aikataulut, jolloin eri toimijoiden suunnitelmien yhteensovittaminen on haastavaa. Myös kyselyn kohderyhmä vaikuttaa saatuihin tuloksiin, sillä tämän diplomityön puitteissa kysely suunnattiin vain joukkoliikenneviranomaisille. Viranomaiset eivät kuitenkaan välttämättä tiedä, millaisia työkaluja liikennöitsijät käyttävät omassa suunnittelutyössään. Ei ole myöskään varmuutta siitä, tavoittiko kysymyslomake kaikissa organisaatioissa sopivat vastaajat, kun lomake lähetettiin järjestöjen kautta yleisellä jakelulla.

## **6.2 Aikataulusijoittelu Visum-ohjelmalla**

Luvussa 3.4.2 on kuvattu Visum-liikennemallin joukkoliikenteen aikataulusijoittelun eroavaisuuksia Emme-malliin verrattuna. Visumin erilaisten sijoitteluominaisuuksien vuoksi tarkoituksena oli testata ohjelmaa käytännössä, ja tutkia tulosten vastaavuutta Emmellä laskettuihin verrattuna. Koska HSL:n mallia käytetään Emmellä ja kahden erillisen mallin ylläpitäminen ei ole järkevää, malli pitäisi saada siirrettyä helposti Emmestä Visumiin sijoitteluja varten, jotta ohjelman käyttäminen ei vaatisi merkittävää lisätyötä. Itse liikenneverkon saikin helposti siirrettyä Emmestä Visumiin, mutta sijoittelussa käytettävät funktiot olisi myös pitänyt ohjelmoida Visumin käyttämällä tavalla. Työn edetessä osoittautuikin, että mallin siirtäminen Emmestä ja sijoittelujen tekeminen vaatii enemmän aikaa ja asiantuntemusta, kuin diplomityön puitteissa oli käytettävissä. Valitettavasti käytännön tarkasteluja ohjelmalla ei siis päästy tekemään, vaan diplomityötä varten kerättiin käyttökokemuksia Visumista haastattelemalla Tampereella ohjelman kanssa työskennelleitä Hanna Kalenojaa ja Markus Pajarretta (Kalenoja ja Pajarre 2014). Tämä luku perustuu tehtyyn haastatteluun.

Visumia käytetään Tampereella joukkoliikenteen sekä pyöräilyn mallintamiseen. Lisäksi Tampereen teknillisessä yliopistossa on laadittu Visumilla Turun seudun malli, ja vastaavaa työtä ollaan aloittamassa myös Tallinnaan. Tampereen joukkoliikenteen malli on luotu alun perin Digiroad-aineiston perusteella, ja se viimeisteltiin käsityönä. Lisenssikoon rajoitusten vuoksi mm. joukkoliikenteelle epäolennaisia linkkejä on poistettu mallista, ja lisäksi joitakin liittymätietoja oli tarpeen korjata. Turun seudun malli on laadittu samalla tavalla, mutta lisäksi oli tarpeen lisätä haja-asutusalueille puuttuvia busiliikenteen katuyhteyksiä. Mallin luominen koettiin melko nopeaksi ja helpoksi, ja esimerkiksi Turun seudun verkon kuvaamiseen kului vain noin viikko aikaa.

Tampereen joukkoliikenteen malliin on kuvattu koko vuorokauden liikenne ja myös sijoittelut tehdään yleensä keskivuorokausiliikenneaineiston perusteella. Joukkoliikenteen nopeudet on määriteltävä mallissa linkkitietoihin koko vuorokaudelle samaksi, ja ne

perustuvat iltahuipputunnin nopeuksiin. Tampereella ei siis ole kokemusta vastaavanlaisesta funktioiden käytöstä joukkoliikenteen matka-aikojen laskennassa kuin luvussa 4.3 kuvattu HSL:n HELMET-mallin menetelmä. Myös koko vuorokauden sijoitteluajanjakso poikkeaa HSL:n käytännöstä, jossa on erikseen mallit aamuhuipputunnille, päivätunnille sekä iltahuipputunnille. Tampereen mallissa keskivuorokausiliikenne on jaettu mallin oletusasetusten mukaisesti aikataulusijoittelua varten, mutta sijoittelussa käytettävät aikaviipaleet voi määritellä myös käsin.

Tampereen mallissa käytetään aikataulusijoitteluun branch & bound –sijoittelumenetelmää. Parametrien määrittämiseksi on tehty herkkyystarkasteluja, joiden perusteella on päädytty käyttämään sijoittelun oletusparametreja. Liikennemuotojen matkustajajakauma on huomioitu mallissa painottamalla eri liikennevälineiden ajoaikaa eri tavoilla, jolloin saadaan näkyviin mm. raideliikenteen suosio bussiliikenteeseen verrattuna. HSL:n Emme-mallissa tämä painotus on toteutettu nousuvastuksen avulla.

Reitinvalintaan käytetään Tampereella Kirchhoffin mallia, jolla on saatu parhaat tulokset, ja myös parametrit on määritetty mallille sopiviksi. Visumin käyttöönoton yhteydessä tutkittiin jonkin verran myös muita reitinvalintamalleja ja havaittiin, että käytettävä malli vaikuttaa merkittävästi saataviin tuloksiin. Kalenoja suosittelikin, että eri mallien antamia tuloksia kannattaisi tutkia ja vertailla tarkemmin, mikäli sijoitteluja tehdään sellaisella verkolla, jossa mahdollisia reittivaihtoehtoja on paljon.

Haastattelun yhteydessä keskusteltiin myös muista Visum-mallin säätömahdollisuuksista. Visumissa on mahdollista mm. painottaa matkan alkuodotusta ja vaihto-odotusta eri tavoilla sekä määrittää vastuksia myös pysäkki- sekä operaattorikohtaisesti. Lisäksi mallilla voidaan laskea karkealla tasolla liikennöintikustannuksia. Näistä ominaisuuksista ei kuitenkaan Tampereella ole kokemuksia. Visum on käytössä melko yleisesti muualla Pohjoismaissa, ja esimerkiksi Tukholmasta voisi saada laajemmin kokemuksia erilaisten mallien ja parametrien käytöstä, mikäli tällaiselle on myöhemmin tarvetta.

## 7 Yksittäisten yhteysvälien testit

Sijoittelusta saatavien matkojen on vastattava suunniteltua liikennettä, jotta aikataulusijoittelun tuloksista olisi hyötyä aikataulusuunnittelussa. Tulosten laadun varmistamiseksi vertailtiin yksittäisten yhteysvälien sijoittelutuloksia HSL:n Reittioppaan antamiin reittivaihtoehtoihin. Reittiopas näyttää matkan eri komponentit samaan tapaan kuin aikataulusijoittelun tuloksissa, jolloin vertailu on helppoa.

Reittioppaan antamat tulokset perustuvat Joukkoliikennerekisteriin ladattuihin pysäkki-aikatauluihin eli ne vastaavat suunniteltua tilannetta. Vertailussa on kuitenkin huomattava, että malli pyrkii kuvaamaan keskimääräistä tilannetta (50-persentiili), kun taas aikataulusuunnittelussa ja myös Reittioppaassa käytetään persentiiliä 40, joka on havaittu matkustajien kannalta parhaaksi suunnittelukriteeriksi (Lukkarinen 2012). Ajoajat eivät siis tältä osin ole täysin vertailukelpoisia.

Tässä luvussa on kuvattu tehtyjä reittivertailutestejä sekä niissä tehtyjä havaintoja.

### 7.1 Tarjotut yhteydet

Tutkimusvälillä Laajasalo – keskusta (sentroidit 1195 – 1090) matka koostuu sekä Reittioppaan että mallin tuloksissa liittytävissä yhteydestä Herttoniemen metroasemalle ja metromatkasta Rautatientorille. Käytetty liittytävissä kuitenkin vaihtelee eri lähteissä. Vain yksi viidestä Reittioppaan tarjoamasta vaihtoehdosta on täsmälleen samanlainen kuin mallin antamissa tuloksissa. Kolmessa Reittioppaan vaihtoehdossa käytetty liittytävissävuoro on sama myös mallissa, mutta metrovuoro on eri. Yksi Reittioppaan tarjoamista reittivaihtoehdoista ei esiinny ollenkaan mallissa, sillä mallin mukaan samaan metrovuoroon ehtii myöhemmälläkin bussilla.

Havaitut erot valittavissa reiteissä johtuvat mallin ja Reittioppaan välisistä matka-aikaeroista. Esimerkiksi linjalla 84 matka-aika Gunillanpolun pysäkiltä Herttoniemen metroasemalle on mallissa 11 minuuttia, kun se suunnitelluissa aikatauluissa on 14-15 minuuttia. Tämä erotus matka-ajassa muuttaa monissa tapauksissa sen, mihin metrovuoroon matkustaja ehtii vaihtaa keskustaan päästäkseen, minkä vuoksi tarjotut reittivaihtoehdot eroavat toisistaan. Malli suosii linjaa 84, kun taas Reittiopas tarjoaa myös yhteyksiä hieman pidemmän kävelymatkan päästä linjalla 86 silloin, kun linjaa 84 ei ole tarjolla kyseiseen metrovuoroon ehtimiseksi.

Tuloksista havaittiin myös, että malli antaa linjalle 84 samaan joukkoliikennevuoroon kaksi eri yhteysvaihtoehtoa eri pysäkkien kautta riippuen toivotusta lähtöminuutista. Mallin antamat tulokset on valitettavasti pyöristetty siten, että ei päästy selvittämään, mistä tämä johtuu. Reittioppaan ja Emmen tarjoamat reittivaihtoehdot yhteysvälillä Laajasalo – keskusta on kuvattu tarkemmin liitteissä 4 ja 5.

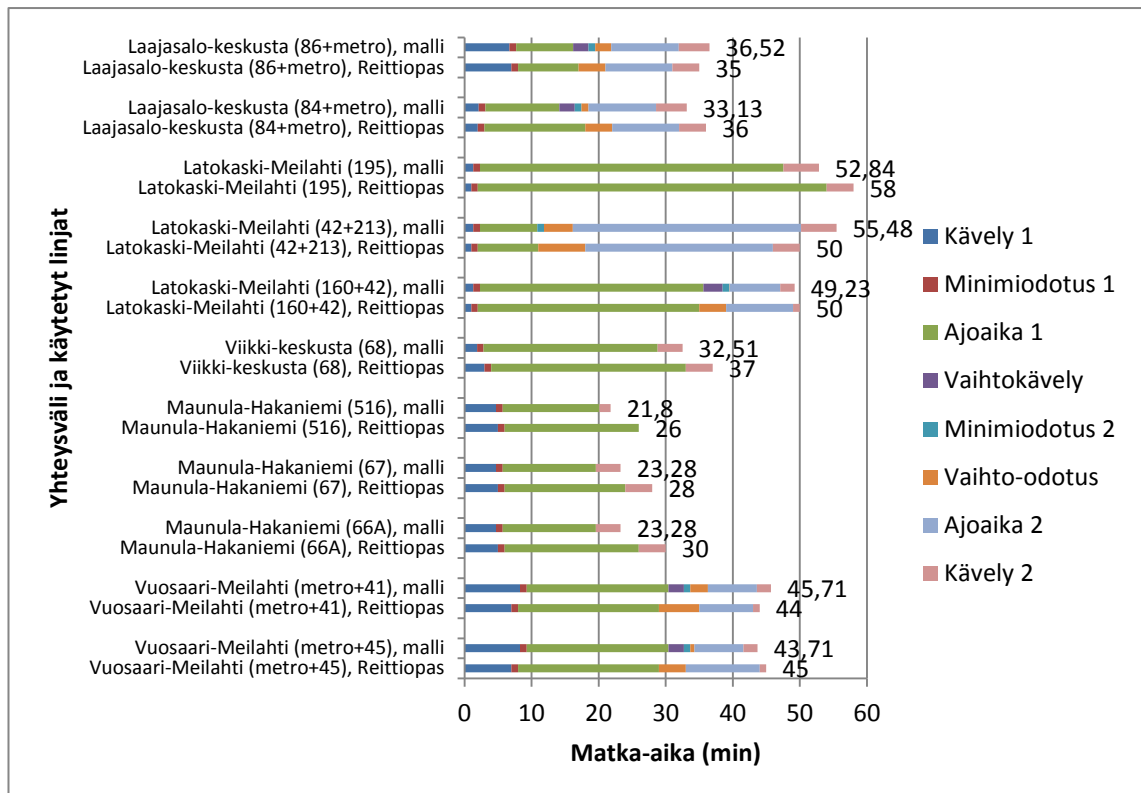
Muut tutkittavat yhteysvälit olivat Latokaski-Meilahti, Viikki-keskusta, Maunula-Hakaniemi, Vuosaari-Meilahti sekä Lauttasaari-Viikki. Useimmilla näistä yhteysväleistä sekä Reittiopas että malli tarjosivat kahta tai useampaa eri reittivaihtoehtoa. Viikki-keskusta – välillä malli tarjosi ainoastaan yhtä vaihtoehtoa linjalla 68. Myös Lauttasaari-Viikki – välillä sekä malli että Reittiopas tarjosivat useita eri vaihtoehtoja, mutta yksikään tarjotuista vaihtoehdoista ei ollut samanlainen molemmissa.

Vertailutarkasteluissa on käytetty saaduista tuloksista sellaisia reittivaihtoehtoja, jotka esiintyivät samanlaisina sekä mallin että Reittioppaan tuloksissa, minkä vuoksi Lauttasaari-Viikki – väliltä ei saatu tuloksia vertailuun. Ajoaikojen ja kävelyaikojen vertailui-

sa on hyödynnetty myös sellaisia reittejä, joilla täsmälleen samoja yhteyksiä ei tarjottu, mutta matkan komponentit ovat vertailukelpoisia.

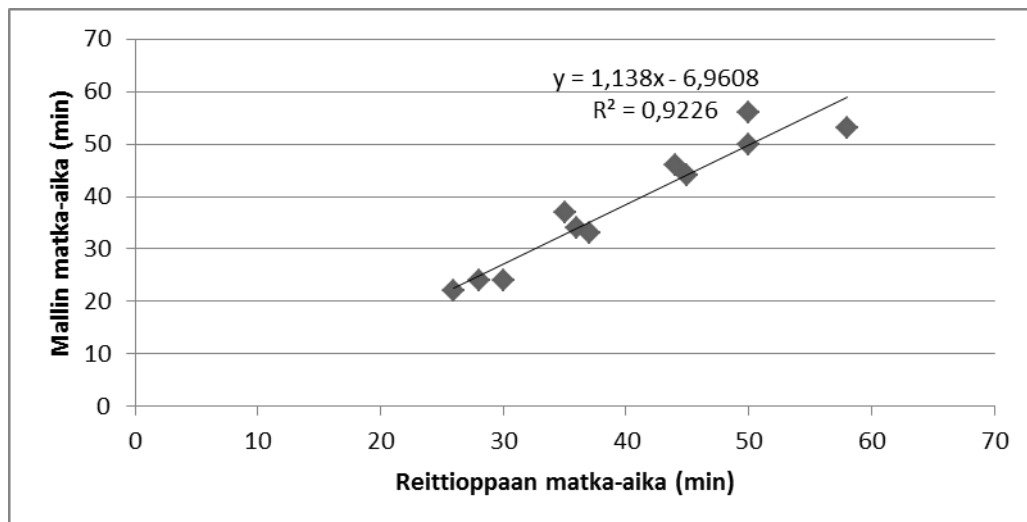
## 7.2 Reitin kokonaismatka-aika

Mallin ja Reittioppaan tarjoamien reittivaihtoehtojen matka-ajan muodostumista vertailtaessa (kuva 14) havaittiin, että malli antoi pääosin lyhyemmän kokonaismatka-ajan kuin Reittiopas, vaikkakin kolmessa tapauksessa yhdestätoista mallin antama matka-aika oli pitempi. Matka-aikojen suhteelliset poikkeamat vaihtelivat välillä 1,5 – 22 %. Suurin absoluuttinen poikkeama 6,7 minuuttia havaittiin yhteysvälillä Maunula-Hakaniemi (linja 66A). Poikkeamien itseisarvojen keskiarvo tutkituilla yhteysväleillä oli 9,8 %. Mikäli tarkastellaan mallin antamien tarkkojen arvojen sijasta lukuja, jotka on pyöristetty Reittioppaan tapaan ylöspäin seuraavaan tasaminuuttiin, saatiin poikkeamien keskiarvoksi 9,0 %.

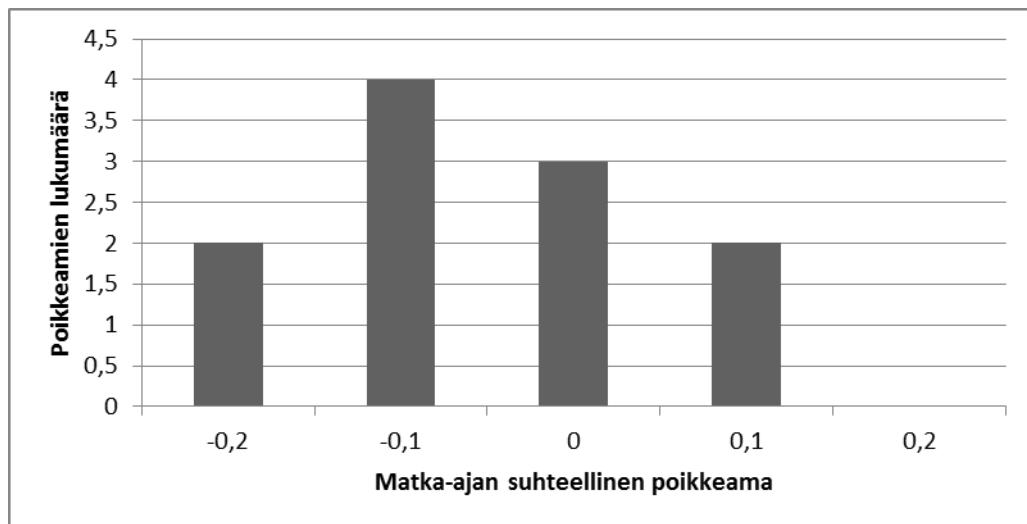


Kuva 14. Matka-ajan muodostuminen.

Matka-aikojen poikkeamia suhteessa Reittioppaan antamiin arvoihin tutkittiin myös sirontakaavion ja suhteellisen poikkeaman histogrammin avulla (kuvat 15 ja 16). Matka-aikojen selitysaste oli 0,92. Lisäksi havaittiin, että poikkeamat painottuivat negatiivisiin arvoihin, eli mallilla oli taipumusta aliarvioida matka-aikoja.



Kuva 15. Sirentakaavio mallin ja Reittioppaan matka-ajoista sekä sovitesuoran yhtälö ja selitysaste.

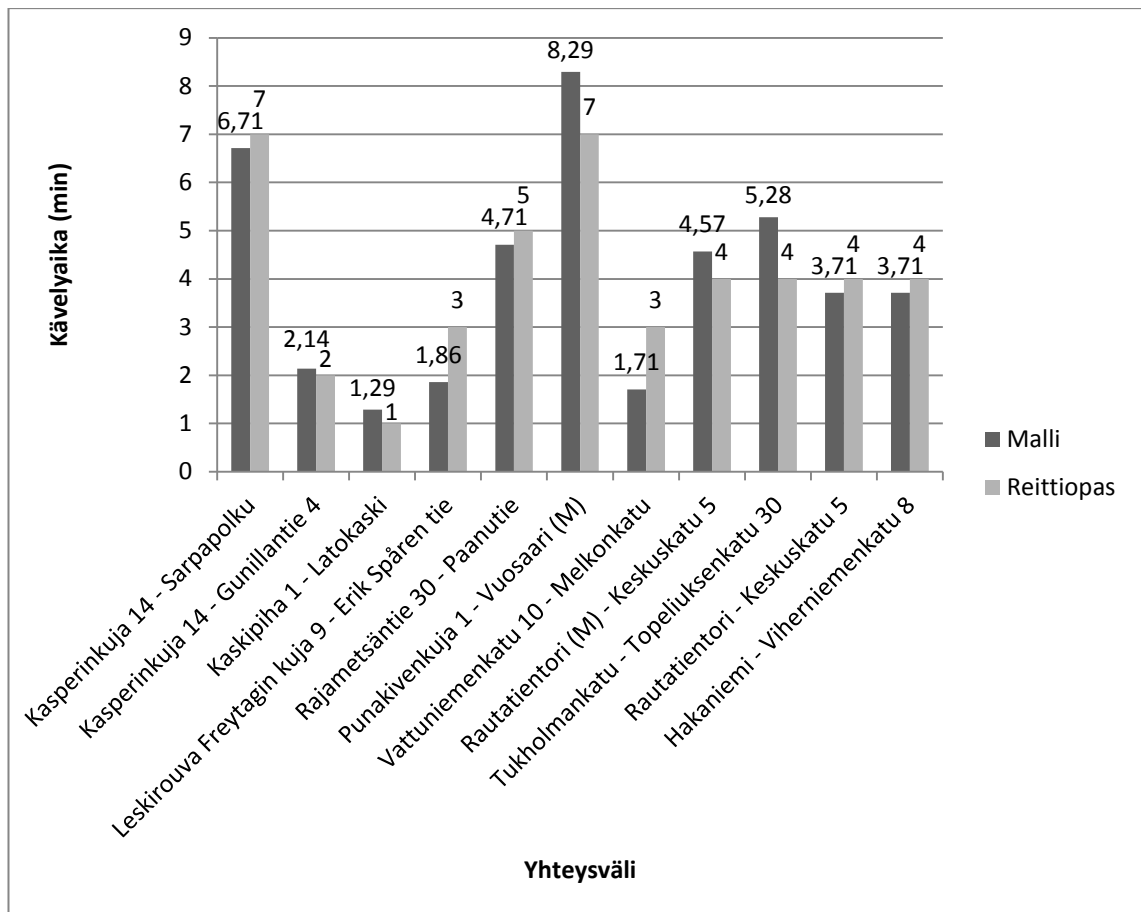


Kuva 16. Histogrammi mallin suhteellisista matka-aikapoikkeamista.

### 7.3 Kävelyaika

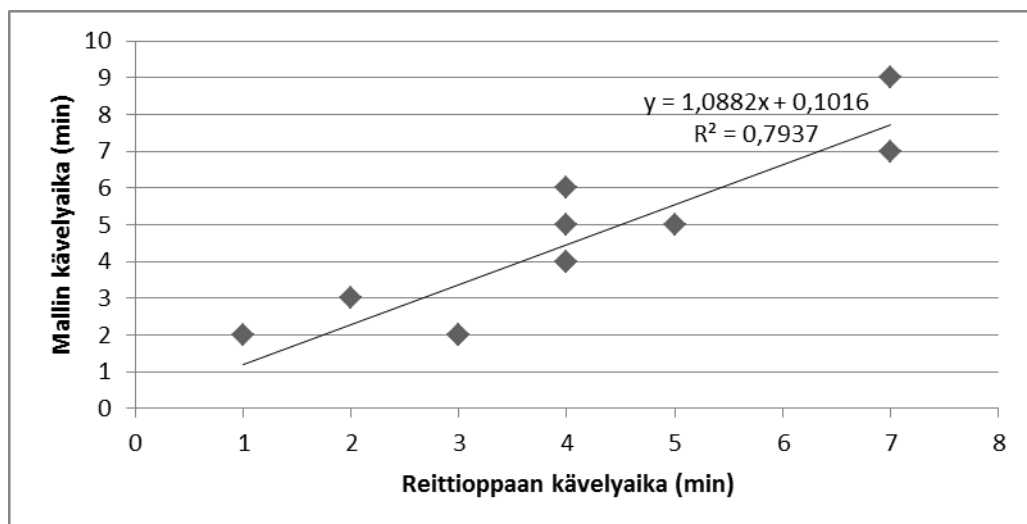
Kävelyaika perustuu sekä mallissa että Reittioppaassa kävelymatkan pituuteen ja kävelynopeuteen. Mikäli verkko olisi molemmissa järjestelmissä kuvattu täsmälleen samalla tavalla, eli kävelymatkat olisivat yhtä pitkät, myös kävelyaikojen pitäisi olla samat. Testeissä kuitenkin havaittiin keskimäärin 19 % poikkeama kävelyaajoissa. Mikäli kävelyaikat pyöristetään ylöspäin kuten Reittioppaassa, keskimääräinen poikkeama nousi 29 prosenttiin. Havaittuja kävelyaikoja on esitetty tarkemmin kuvassa 17.



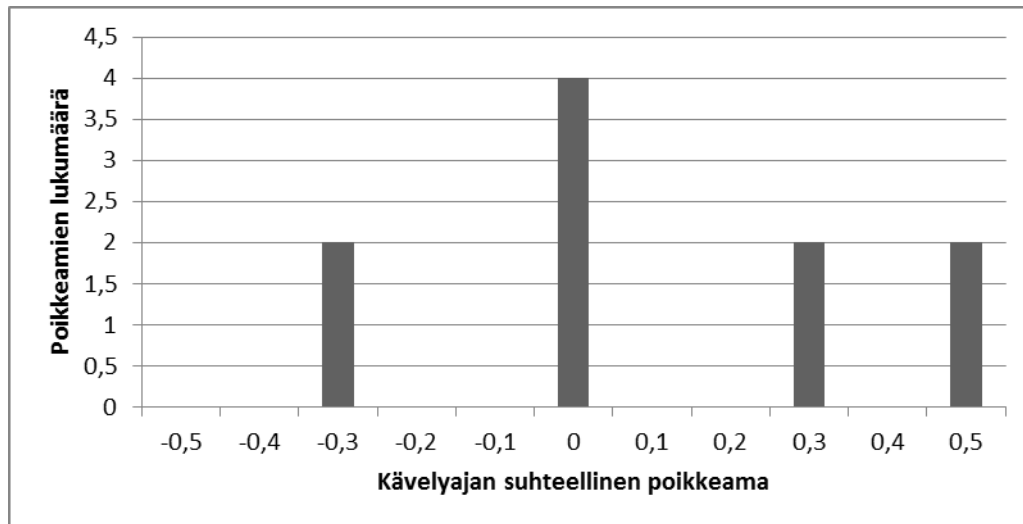


Kuva 17. Kävelyaikojen vertailu.

Kävelyaikojen poikkeamia suhteessa Reittioppaan antamiin arvoihin tutkittiin myös sirontakaavion ja suhteellisen poikkeaman histogrammin avulla (kuvat 18 ja 19). Kävelyaikojen selitysaste oli 0,79. Kävelyaikojen poikkeamat olivat melko tasaisesti jakautuneita, mutta mallilla oli taipumusta hieman yliarvioida kävelyaikoja.



Kuva 18. Sirontakaavio mallin ja Reittioppaan kävelyaajoista sekä sovitesuoran yhtälö ja selitysaste.



Kuva 19. Histogrammi mallin suhteellisista kävelyaikapoikkeamista.

Kävelyaikoihin aiheutuu eroavaisuutta monista eri osatekijöistä. Kävelymatkat sentroideilta liikenneverkolle on määritetty linnuntie-etäisyyden mukaan, kun taas Reittioppaaseen kävelyreitit on koodattu tarkemmin vastaamaan todellisia matkan pituuksia. Tämä aiheuttaa sen, että mallin antamat kävelyetäisyydet ja -ajat saattavat olla systemaattisesti lyhyempiä. Nyt tehdyissä testeissä lähtö- ja määräpaikkojen sijainnit valittiin samoiksi kuin mallin sentroidit. Virhettä syntyy myös siitä, mikäli lähtö- tai määräpaikaksi valitaan sellainen paikka, jossa mallissa ei ole solmua. Tällöin kuvausta on yksinkertaistettava mallia varten siten, että valitaan lähin solmu, joka mallissa on käytettävissä, jolloin myös etäisyydet ja matka-ajat lasketaan tämän paikan mukaan.

Mallin koodaustapa on karkea myös muilta osin. Osa pysäkeistä on koodattu yksinkertaisuuden vuoksi risteyksiin, vaikka ne todellisuudessa sijaitsevat korttelin keskellä. Joillakin linjoilla taas on virheellisesti koodattu pysäkkejä myös sellaisiin risteyksiin, joiden lähellä ei ole pysäkkiä. Lisäksi kevyen liikenteen verkon kuvaus on melko karkea, eli joitakin kevyen liikenteen yhteyksiä puuttuu, mikä vääristää etäisyyksiä suhteessa todellisuuteen. Reittioppaan verkkoon on kuvattu kevyen liikenteen yhteydet huomattavasti tarkemmin, mutta samantyyppistä virhettä esiintyy silti paikoitellen. HELMET-mallin virheet johtuvat mm. Digiroadista tuodusta virheitä sisältäneestä lähtöaineistosta sekä tavoitteesta yksinkertaistaa mallin verkkoa.

Tutkituista reiteistä suurin suhteellinen ero syntyi välillä Vattuniemenkatu 10 – Melkonkatu. Tälle välille malli antoi etäisyydeksi 120 metriä, kun taas Reittiopas laski matkaksi 400 metriä. Suurin osa erosta selittyy sillä, että mallissa nousupysäkin solmu on kuvattu etelämmäksi, eli lähemmäs lähtöpistettä, kuin se todellisuudessa on (kuva 20). Myös toiseksi suurimman poikkeaman antavalla välillä Leskirouva Freytagin kuja 9 – Erik Spåren tie pääosa erosta johtuu samanlaisesta syystä. Tälle välille malli antoi etäisyydeksi 130 metriä, kun taas Reittiopas laski matkaksi 300 metriä. Tässä tapauksessa Reittioppaan antama etäisyys vaikuttaisi olleen hieman yläkanttiin, mikä aiheuttaa erityisen suuren eron malliin nähden.



Kuva 20. Kävely-yhteydet Vattuniemenkatu 10 – Melkonkatu mallin ja Reittioppaan tuloksissa.

Suurimmat sellaiset erot, joissa malli laskee kävelyetäisyyden Reittiopasta pitemmäksi, esiintyivät väleillä Punakivenkuja 1 – Vuosaari (M) sekä Tukholmankatu – Haartmaninkatu 1. Vuosaaressa malli arvioi etäisyydeksi 580 metriä ja Reittiopas 500 metriä, mistä syntyy 1,3 minuutin poikkeama. Mallin segmenttejä vastaava linnuntie-etäisyys on n. 500 metriä, joten mallin antama etäisyys oli hieman yläkanttiin. Tämä eroavaisuus muodostui lähinnä viimeisellä välillä kadulta metroasemalle, joten siinä on kenties huomioitu muutakin kuin pelkkä etäisyys. Myös Meilahdessa mallin antama etäisyys vastasi melko hyvin kartalta mitattua, kun taas Reittioppaan laskema neljä minuuttia oli jonkin verran alakanttiin ilmoitettuun 400 metrin etäisyyteen nähden.

Varsinaisen kävelyajan lisäksi mallissa käytetään jokaisen nousun yhteydessä minimiodotusaikaa, joka kuvaa sitä aikaa, jonka matkustaja varaa varmuuden vuoksi pysäkillle saapumiseensa bussin mahdollisen etuajassa ajamisen varalta. Sama varmuusmarginaali varataan myös vaihtojen yhteydessä. Näissä tarkasteluissa minimiodotusaika on määritetty yhdeksi minuutiksi. Reittiopas laskee myös automaattisesti yhden minuutin varmuusmarginaalin mukaan ensimmäiseen kävelyaikaan. Lisäksi voidaan määrittää vaihtomarginaali, jota sovelletaan vaihtojen yhteydessä. Myös tämän arvoksi on tutkimuksissa asetettu yksi minuutti.

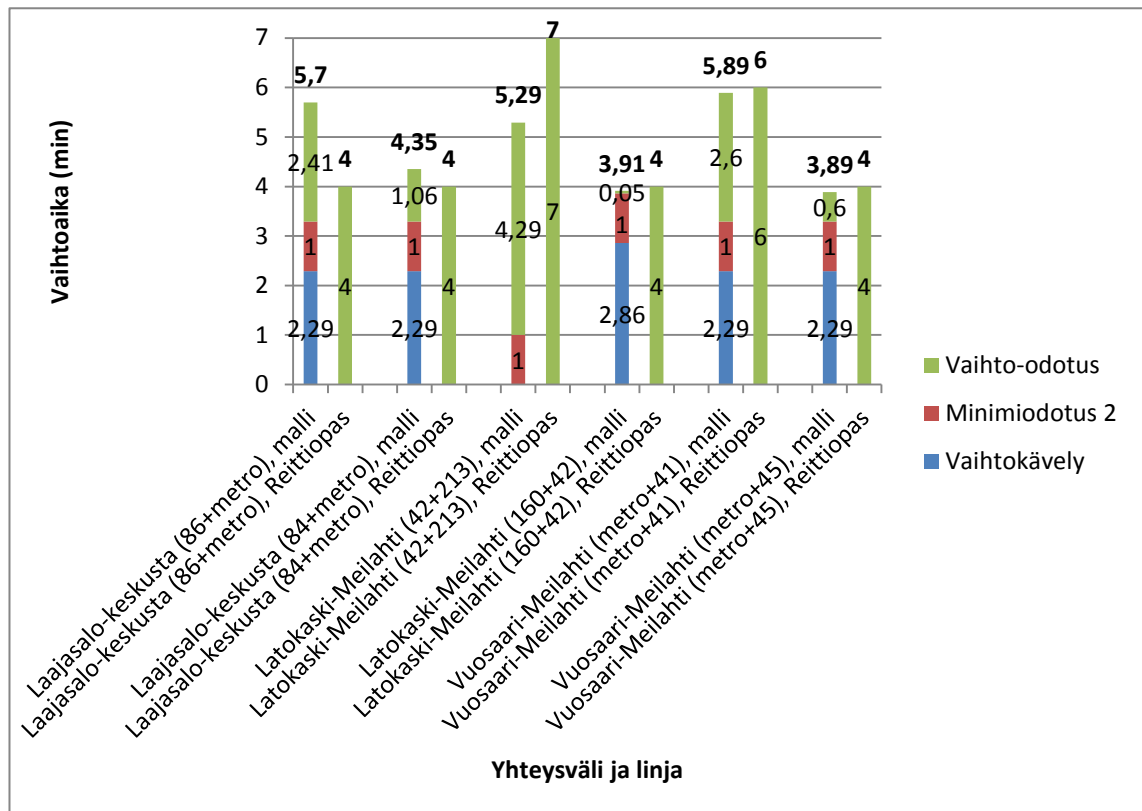
## 7.4 Vaihtoaika

Vaihtoon tarvittava vähimmäisaika lasketaan sekä mallissa että Reittioppaassa hyvin samankaltaisesti vaihtoon tarvittavan kävelyajan ja minimiodotusajan summana. Vaihtoaikaan lasketaan lisäksi varsinainen ajoneuvon saapumisen odottaminen, mikäli vaihtoyhteys ei toteudu heti minimiajan jälkeen. Reittioppaan tuloksissa näitä vaihtoajan eri komponentteja ei ole eritelty, vaan esitetään pelkkä kokonaisvaihtoaika. Tämän vuoksi ajatuksena oli tehdä myös vertailu tämän kokonaissumman perusteella.

Vertailujen tekeminen osoittautui kuitenkin erittäin haastavaksi, sillä vaihdollisissa yhteyksissä mallin ja Reittioppaan tulokset poikkesivat usein toisistaan niin paljon, että ei löydetty tuloksista toistuvia yhteyksiä, joita voisi vertailla. Esimerkiksi välillä Lauttasaari-Viikki matkustaja ehtii mallin mukaan jo aiempaan jatkoyhteyteen, kuin mitä Reittiopas laskee, sillä mallin antamat ajoajat ovat lyhyemmät. Lisäksi malli ja Reittiopas saattoivat ehdottaa samoilta linjoilta vaihtoyhteyttä eri paikassa. Osa eroavaisuuksista johtui siitä, että Reittiopas tarjosi yhteyksiä sellaisilla linjoilla, joita ei ollut koodattu aikataulupohjaiseen malliin. Muun muassa näistä syistä kaikki vaihtoajat eivät ole vertailukelpoisia.

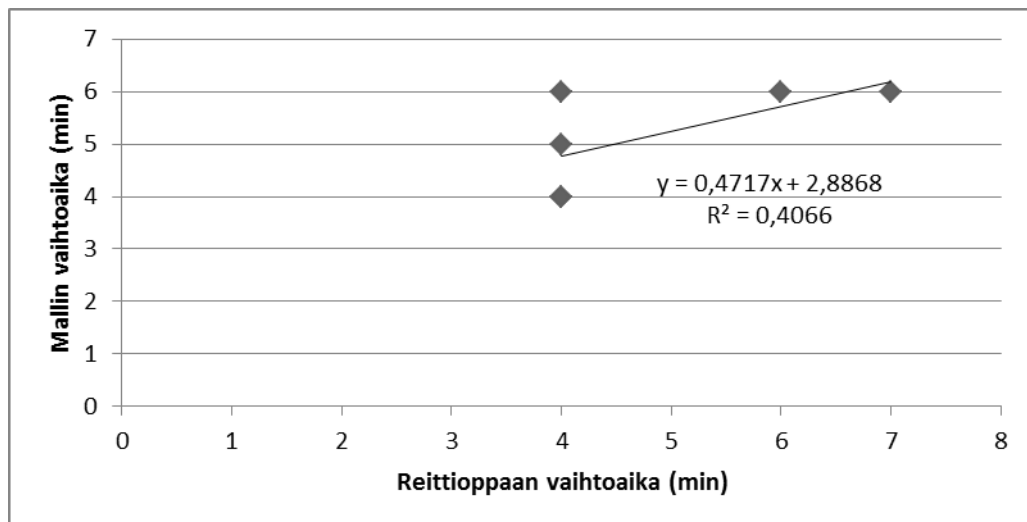
Tutkituilla testiväleillä saatiin täsmälleen samoja vuoroja käyttäviä yhteyksiä aikaiseksi lähinnä metroa käyttävillä matkoilla. Tämä johtuu ainakin osittain siitä, että metron ajoajat on koodattu malliin täsmällisesti, jolloin vaihtoajat myös vastaavat pääosin hyvin toisiaan, kuten kuvasta 21 voidaan havaita. Tutkituilla matkoilla vaihtoajan keskimääräinen poikkeama oli 14 %. Ylöspäin pyöristetyillä vaihtoajoilla keskimääräinen poikkeama oli 15 %.

Metrovaihdoissa valtaosa poikkeamasta selittyy mallin ja Reittioppaan tulosten erilaisella tarkkuudella. Merkittäviä eroavaisuuksia havaittiin yhteyksillä 86 + metro sekä 42 + 213. Nämä erot johtuvat ajoaikojen eroavaisuuksista, joita on kuvattu tarkemmin seuraavassa kappaleessa.

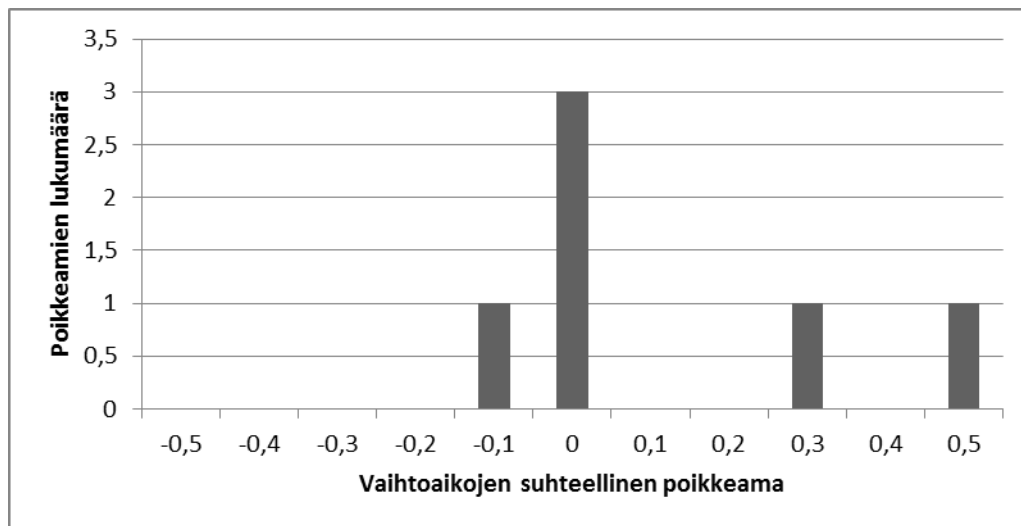


Kuva 21. Vaihtoaikojen vertailu.

Vaihtoaikojen poikkeamia suhteessa Reittioppaan antamiin arvoihin tutkittiin myös sirontakaavion ja suhteellisen poikkeaman histogrammin avulla (kuvat 22 ja 23). Vaihtoaikojen selitysaste oli 0,41. Vaihtoaikojen poikkeamat olivat melko tasaisesti jakautuneita, mutta mallilla oli taipumusta hieman yliarvioida vaihtoajoja. Vaihtojen tarkastelun otoskoko oli niin pieni (6 kpl), että sen perusteella ei voi tehdä luotettavia tilastollisia päätelmiä.



Kuva 22. Sirontakaavio mallin ja Reittioppaan vaihtoaajoista sekä sovitesuoran yhtälö ja selitysaste.



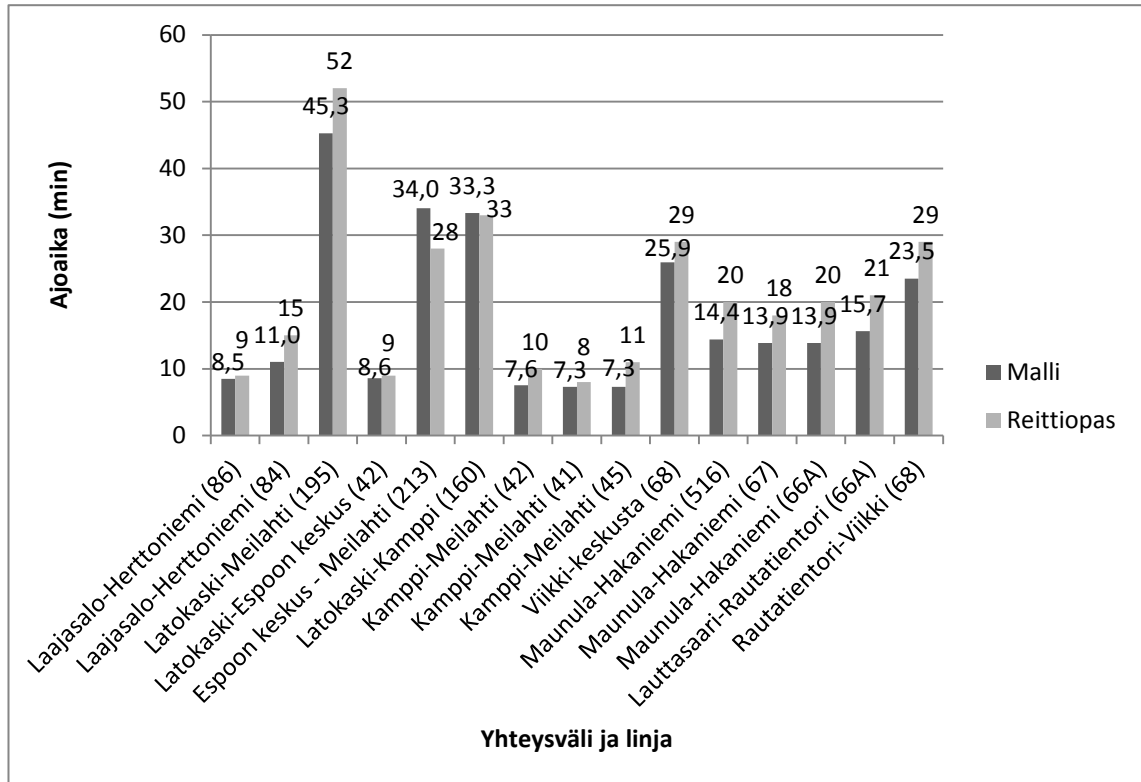
Kuva 23. Histogrammi mallin suhteellisista vaihtoaikapoikkeamista.

Vaihtoaikojen erillistarkastelu ei myöskään välttämättä ole mielekäästä, koska vaihtoaika on täysin riippuvainen vaihtokävelyaajasta, minimiodotusajasta sekä joukkoliikenteen aikatauluista. Tämän vuoksi vertailut kannattaa keskittää näihin komponentteihin. Valittavasti vaihtokävelyaikaa ei kuitenkaan Reittioppaan kautta pystytä erikseen tutki-  
maan, mutta voidaan olettaa sen noudattavan samoja lainalaisuuksia kuin aiemmin tut-  
kitut kävelyaikatkin. Mikäli siis muut matka-aikakomponentit vastaavat toisiaan, myös  
vaihtoaikat muodostuvat hyvin samanlaisiksi.

## 7.5 Ajoaika

Ajoaikojen vertailussa (kuva 24) oli mukana myös reitti Lauttasaari-Viikki. Tutkittavia  
bussiyhteyksiä oli yhteensä 15 kpl. Lisäksi neljällä matkalla käytettiin metroa, mutta  
metron ajoajat on koodattu täsmällisesti malliin, joten niitä ei otettu tarkasteluun mu-  
kaan. Raitiovaunuja tai lähijunia ei tutkituilla reiteillä käytetty sellaisilla väleillä, joista  
olisi saatu vertailukelpoisia tuloksia. Raitiovaunujen nopeudet mallissa perustuvat todel-  
lisiin mitattuihin nopeuksiin, ja lähijunille on koodattu täsmälliset ajoajat samaan tapaan  
kuin metrolle. Tässä yhteydessä keskityttiin siis pelkästään bussilinjojen ajoaikojen ver-  
tailuun.

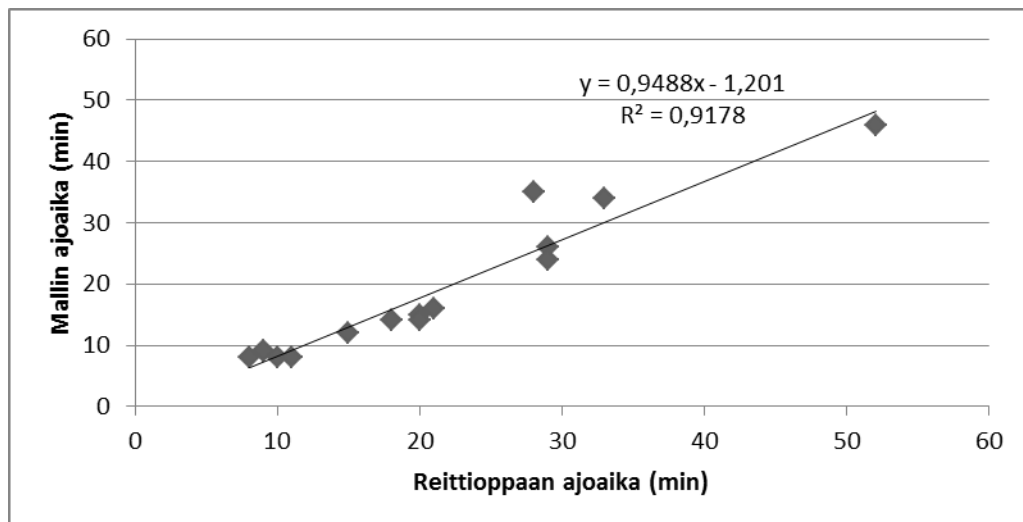
Ajoaikojen absoluuttinen poikkeama tutkituilla bussilinjoilla vaihteli -6,04 minuutista (Espoon keskus – Meilahti, linja 213) 6,73 minuuttiin (Latokaski-Meilahti, linja 195) ja suhteellinen poikkeama 1 %:sta (Latokaski-Kamppi, linja 160) 34 prosenttiin (Kamppi-Meilahti, linja 45). Poikkeamien itseisarvojen keskiarvo oli 18 %. Ylöspäin pyöristäen ajoaikapoikkeamien keskiarvoksi saatiin 16 %.



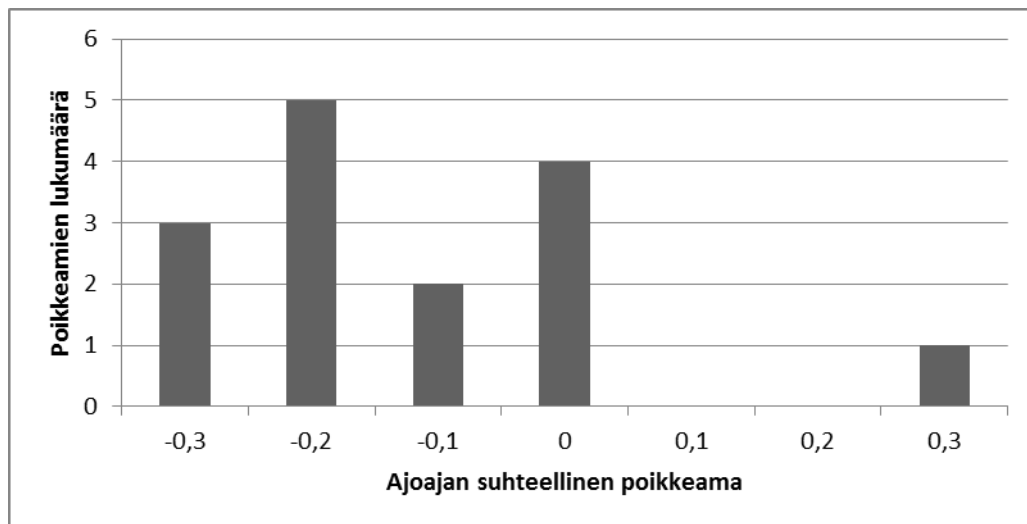
Kuva 24. Ajoaikojen vertailu.

Kahdessa tapauksessa tutkituista malli antoi pidemmän ajoajan kuin Reittioppaan mukainen suunniteltu liikenne, ja toisessa näistä poikkeama suhteessa kokonaisajoaikaan oli tutkituista pienimpien joukossa. Poikkeuksena kuitenkin linjalla 213 ajoajan suhteellinen poikkeama oli 22 %, vaikka matkan pituus on kuitenkin lähes sama (17 km / Reittiopas, 16,26 km / malli).

Ajoaikapoikkeamia tutkittiin myös sirontakaavion sekä suhteellisen virheen kautta (kuvat 25 ja 26). Mallin selitysaste suhteessa Reittioppaan ajoaikoihin oli 0,92. Ajoaikojen suhteellinen virhe oli painottunut negatiivisiin tuloksiin eli mallilla oli taipumusta aliarvioida ajoaikoja.



Kuva 25. Sirontakaavio mallin ja Reittioppaan ajoajoista sekä sovitesuoran yhtälö ja selitysaste.



Kuva 26. Histogrammi mallin suhteellisista ajoaikapoikkeamista.

Mallin ajoajat kuvaavat keskimääräistä tilannetta (persentiili 50), kun taas suunnitellut ajoajat perustuvat 40-persentiiliin, kuten luvussa 4.2 on kuvattu. Tämän vuoksi olisi oletettavaa, että mallin ajoajat olisivat hieman pitempiä kuin suunnitellut. Testien perusteella havaittiin kuitenkin, että Emmen antamat bussien matka-ajat olivat usein lyhyempiä kuin Reittioppaassa. Tämä johtuu luultavasti siitä, että ne lasketaan järjestelmässä erillisten funktioiden avulla, joita on kuvattu luvussa 4.3. Funktioiden käyttö matka-ajan laskennassa aiheuttaa jonkin verran eroavaisuuksia suunniteltuihin aikatauluihin verrattuna, mikä heijastuu myös valittaviin reitteihin.

HELMET-mallin vuoden 2012 päivitystyön yhteydessä tutkittiin laajemmin, kuinka hyvin mallin funktioiden laskemat joukkoliikenteen matka-ajat vastaavat todellisuutta. Työssä vertailtiin mallin antamia tuloksia syksyn 2011 matkakorttiaineiston nopeusdatan keskiarvoon 39 tarkasteluvälillä. Tutkimuksessa todetaan, että ”pääasiassa bussien matka-ajat ovat melko hyvin arvioituja, eikä ainakaan selkeää virhettä voi aineistosta osoittaa. Kuitenkin vain 56% ajoajoista jää alle 20% suhteellisen virheen. Jakauma on hieman vino oikealle, mikä viittaisi nopeuksien pieneen yliarviointiin. Sen sijaan bussi-kaistallisten osuoksien nopeuksissa vaikuttaisi olevan vääristymä. ... Suurilla väylillä bussien viivytyskerroin vaikuttaisi olevan liian suuri ja pienemmillä väylillä taas liian pieni.” (Trafix 2013)

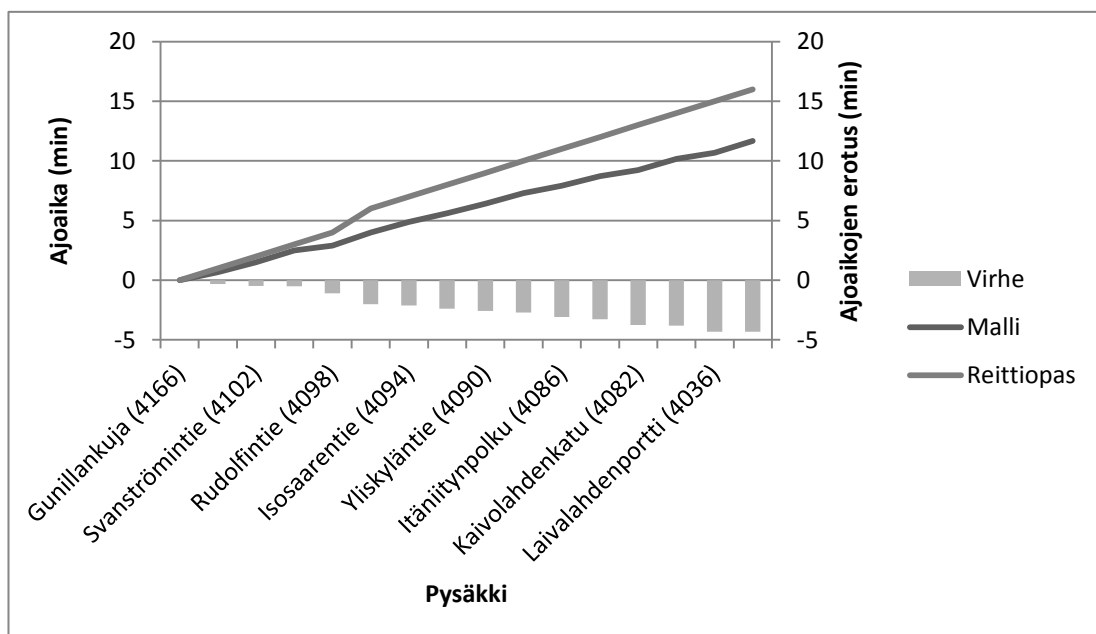
Trafixin (2013) tulokset eivät ole täysin vertailukelpoisia tässä diplomityössä tehtyjen vertailujen kanssa, koska Trafixin tutkimuksessa vertailukohtana oli matkakorttiaineiston keskiarvo, kun taas diplomityössä on tutkittu suunniteltuja ajoaikoja, jotka vastaavat suunnilleen matkakorttiaineiston persentiiliä 40. Tulokset ovat kuitenkin samansuuntaisia, kuin tässä diplomityössä tehtyjen vertailujen perusteella, sillä molemmissa mallin laskemat ajoajat aliarvioivat matka-aikoja eli yliarvioivat nopeuksia. Lisäksi myös Trafixin tutkimuksessa todetaan, että suhteellista virhettä on melko paljon.

Trafixin (2013) tutkimuksen perusteella mallin tarkkuustaso riittää mallin perinteisiin käyttötarkoituksiin eli strategisen tason ennusteiden laatimiseen sekä vaikutusten arviointiin. Taktisella suunnittelutasolla aikataulusuunnittelussa tulosten pitäisi kuitenkin olla tarkempia. Koska mallin antamat ajoajat voivat poiketa merkittävästi suunnitelluista, tästä voi aiheutua selkeää virhettä etenkin vaihdollisissa yhteyksissä. Esimerkiksi vaihtojen toteutumisen tutkiminen edellyttääkin, että malli vastaa hyvin tutkittavaa suunnittelutilannetta.

## 7.6 Ajoajan muodostuminen

Ajoaikaeroavaisuuksien selittämiseksi tutkittiin vielä tarkemmin ajoajan muodostumista muutamilla reiteillä, ja pyrittiin paikantamaan, missä virhettä syntyy sekä mistä se johtuu. Tarkempiin tarkasteluihin valittiin linjat 45, 84, 86 sekä 213, sillä linjalla 45 oli suurin havaittu suhteellinen poikkeama, linjat 84 ja 86 kuuluvat Laajasalon tarkemmin testattavaan alueeseen, ja linjalla 213 taas havaittu poikkeama oli pääsäännöstä poiketen voimakkaasti negatiivinen. Näissä testeissä kokonaisajoajan suhteellinen virhe oli enimmillään -27 %, mikä saattaa merkittävästi vääristää mallin antamia tuloksia. Näissä tarkemmissa tutkimuksissa ei kuitenkaan havaittu johdonmukaisia eroavaisuuksia, joilla vaihtelua voisi yleispätevästi selittää. Malliin on siis syytä koodata suunnitelmien mukaiset tarkemmat ajoajat, mikäli mallia haluaisi käyttää detaljitason aikataulusuunnittelussa. Seuraavassa on kuvattu tarkemmin havaintoja tutkituilta linjoilta.

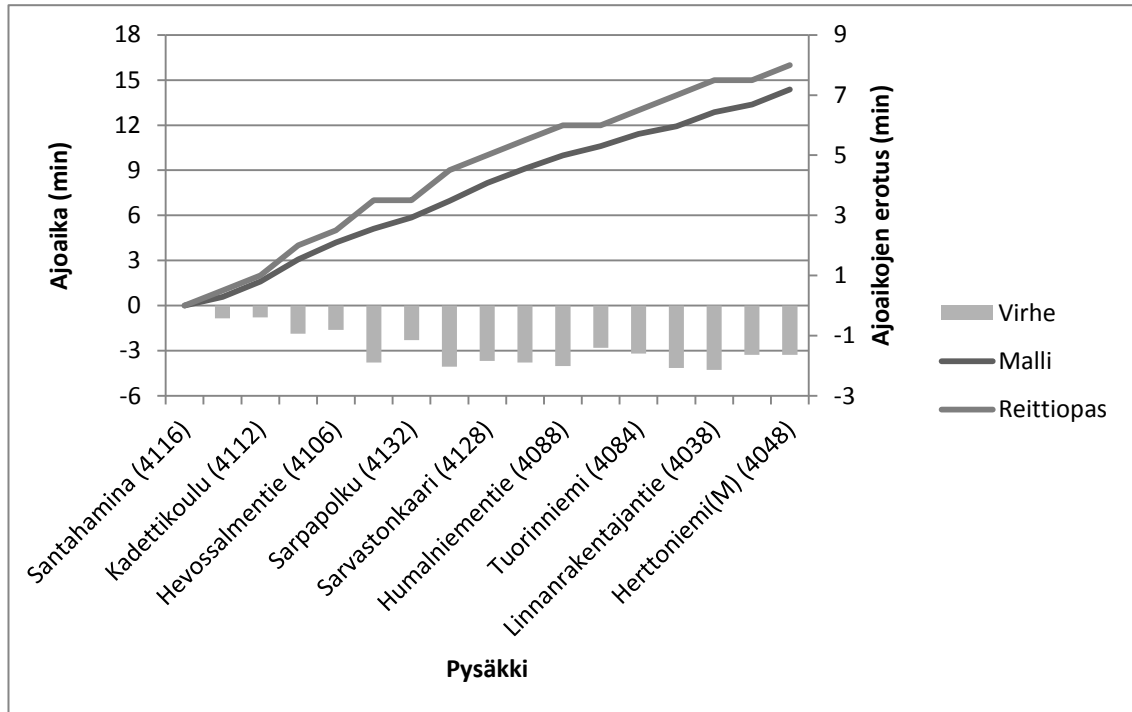
Linjalla 84 ajoaikojen poikkeama kasvoi melko tasaisesti reitin edetessä (kuva 27). Tämä viittaa siihen, että linjan nopeus arvioidaan mallissa hieman alakanttiin suunniteltuihin aikatauluihin verrattuna. Kokonaisajoajan suhteellinen virhe oli -27 %.



Kuva 27. Ajoajan muodostuminen pysäkeittäin linjalla 84.

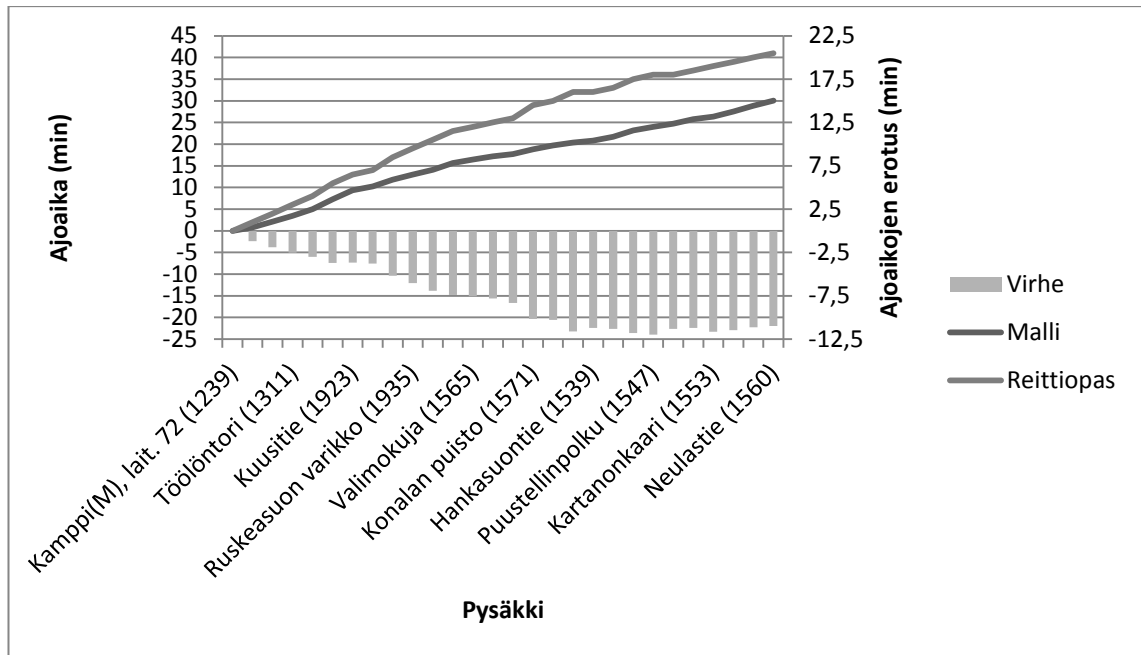


Linjalla 86 mallin antama ajoaika oli myös pienempi kuin suunniteltu (kuva 28). Suunniteltu ajoaika ei kasva tasaisesti pysäkkiväleittäin, kun taas mallissa nopeus on melko tasainen. Osittain tämän vuoksi virheen suuruus vaihteli jonkin verran reitin varrella. Suurimmillaan virhe oli Linnanrakentajantien pysäkillä, mutta suhteellista virhettä oli enemmän reitin alkupäässä. Kokonaisajoajan suhteellinen virhe oli -10 %.



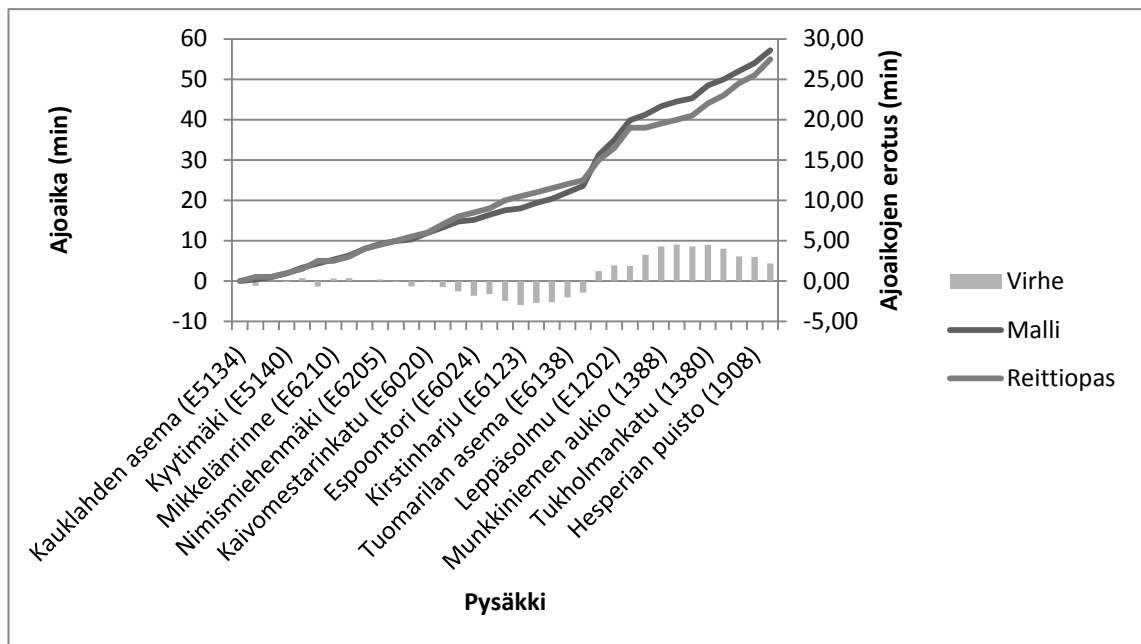
Kuva 28. Ajoajan muodostuminen pysäkeittäin linjalla 86.

Myös linjalla 45 mallin antama ajoaika oli selvästi pienempi kuin suunnitelmissa (kuva 29). Virhe kasvaa melko tasaisesti Malminkartanonkujan pysäkillä saakka, minkä jälkeen virhe pysyy jokseenkin samansuuruisena reitin loppuun. Reitin nopeus Malmin-kartanossa vastasi siis mallissa melko hyvin suunniteltua, mutta keskustan päässä malli arvioi reitin suunniteltua nopeammaksi. Myös linjalla 45 kokonaisajoajan suhteellinen virhe oli -27 %.



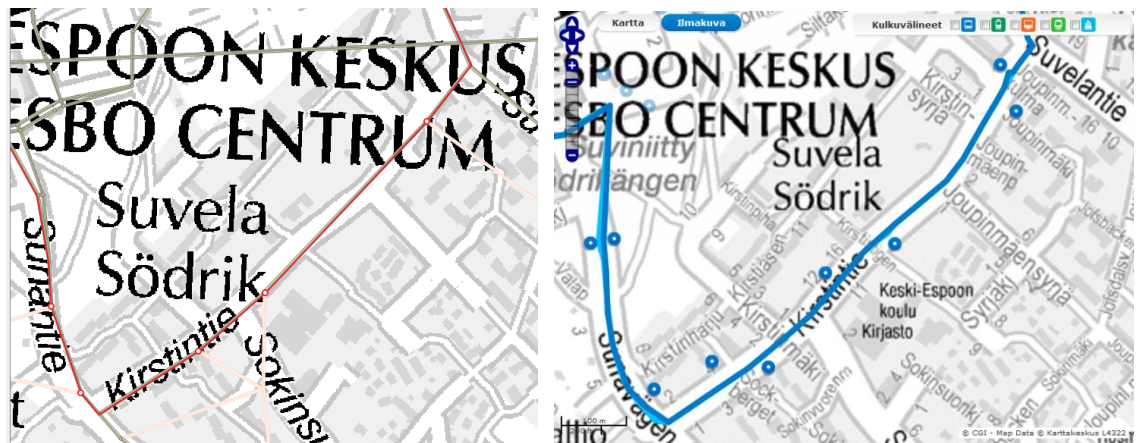
Kuva 29. Ajoajan muodostuminen pysäkeittäin linjalla 45.

Linjalla 213 eron suuruus ja suunta vaihtelivat reitinkohdasta riippuen, ja kokonaisajoajan suhteellinen virhe olikin linjalla vain 4 %. Kuvasta 30 voidaan havaita, että Espoossa mallin antamat ajoajat olivat melko lähellä suunniteltuja tai jonkin verran lyhyemmät. Moottoritieosuudella ja sen jälkeen erotus muuttuu positiiviseksi eli Helsingin päässä malli ennakoii ajoajat pitemmiksi eli ajon ruuhkaisemmaksi kuin suunnitelmissa.



Kuva 30. Ajoajan muodostuminen pysäkeittäin linjalla 213.

Suurimmat erot muodostuivat pysäkeillä Kirstinharju (-2,97 min) ja Paciuksenkaari (4,51 min). Erosta ainoastaan pieni osa voi selittyä pysäkin sijoittumisella mallissa, sillä erot mallin ja todellisen pysäkin sijainnin välillä ovat hyvin pieniä. Myös viereiset pysäkit sijoittuvat hyvin lähelle oikeaa paikkaansa ja näilläkin on silti merkittävää eroa ajoajassa (kuvat 31 ja 32).



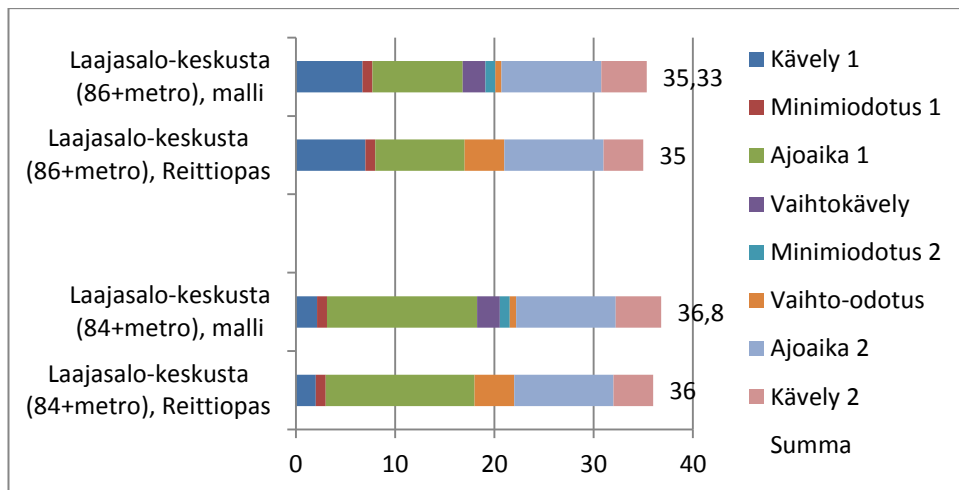
Kuva 31. Pysäkkien sijoittuminen Kirstintiellä mallissa ja Reittioppaassa.



Kuva 32. Pysäkkien sijoittuminen Paciuksenkadulla mallissa ja Reittioppaassa.

## 7.7 Ajoaikojen tarkentamisen vaikutukset mallin tarjoamiin reitteihin

Ensimmäisissä reittivertailutesteissä havaittiin, että eroavaisuudet ajoajoissa vaikuttavat merkittävästi mallin tarjoamiin reitteihin. Tämän vuoksi yhteysvälillä Laajasalo – keskusta kokeiltiin myös tarkentaa mallin ajoajat vastaamaan suunniteltuja, ja tutkittiin, miten tämä vaikuttaa mallin tarjoamiin reitteihin. Tulokset vastasivat hyvin ennakoitua, eli suunnitelluilla ajoajoilla malli tarjosi täsmälleen samanlaisia yhteyksiä kuin Reittiopas (kuva 33). Tämän perusteella mallia voisi siis käyttää Reittioppaan tapaan tarkennetuilla ajoajoilla.



Kuva 33. Matka-ajan muodostuminen tarkennetuilla ajoajoilla.

## 7.8 Havainnot

Testien perusteella merkittävimmät eroavaisuudet mallin ja suunnitelmien välillä olivat kävelyajoissa (19 %) sekä bussilinjojen ajoajoissa (18 %). Kävelyajan osuus kokonaismatka-ajasta vaihteli välillä 4 – 36 %, kun taas ajoaikojen vastaava osuus oli 51 – 90 %. Kävelyajojen eroavaisuuksien vaikutus tuloksiin oli siis huomattavasti pienempi kuin ajoaikapoikkeamien. Testeissä ei myöskään havaittu tapauksia, joissa erot kävelyajoissa olisivat vaikuttaneet tarjottaviin reittiehdotuksiin.

Ajoaikojen vaikutus tarjottaviin yhteyksiin sen sijaan oli testeissä merkittävä. Jotta suunnitelmia voisi mallilla tarkastella mahdollisimman täsmällisesti, mallin ajoaikoja olisi syytä tarkentaa siten, että ne vastaisivat paremmin suunniteltua tilannetta, sillä esimerkiksi vaihtojen onnistumisen tarkastelu virheellisillä ajoajoilla tuottaa myös virheellisen lopputuloksen.

Tätä diplomityötä varten tarvittavat linjatiedostot tuotettiin käsityönä, mutta ajoaikojen tarkentaminen käsin vie erittäin paljon aikaa ja on lisäksi hyvin altista virheille koodauksessa. Mikäli aikataulupohjaisille linjatiedostoille on tarvetta myös jatkossa, tiedostojen tuottaminen kannattaa ehdottomasti automatisoida. Diplomityön yhteydessä selvitetiinkin INROlta mahdollisuutta tuottaa Hastuksen aikatauludatan perusteella Emmen aikataulupohjainen linjakuvauks, ja tällainen onnistuu, kunhan Hastuksen pysäkkien ja Emmen solmujen väliset vastaavuudet on määritelty. Myös tällaisen vastaavuustaulukon tuottaminen on melko työläs kertaus, ja lisäksi taulukkoa täytyy ylläpitää linjasto- muutosten yhteydessä. Automatisointi helpottaisi kuitenkin huomattavasti tarvittavaa kokonaistyömäärää, sekä auttaisi varmistamaan tuotettujen linjatiedostojen oikeellisuuden.

Mikäli ajoaikojen poikkeama olisi systemaattisesti tietyn suuruinen ja suuntainen, ajoaikaa voisi korjata todellisuutta vastaavaksi myös korjauskertoimen avulla. Tällainen kuvaustapa säästäisi tallennustilaa sekä työtä täsmälliseen määrittelytapaan verrattuna. Edellisessä luvussa havaittiin kuitenkin, että poikkeama ei ole täysin systemaattista, jolloin ainakaan yleinen korjauskerroin ei antaisi riittävän täsmällisiä tuloksia.

Näiden testien tuloksissa virhettä aiheuttaa myös se, että tarkasteluihin on otettu vain sellaisia yhteyksiä, joissa mallin ja Reittioppaan tulokset olivat hyvin toisiaan vastaavia, jolloin tarkka vertailu oli mahdollista. Testeissä tuli esille myös sellaisia yhteysvälejä, joissa yksikään yhteys ei ollut sama sekä mallissa että Reittioppaassa, ja nämä reitit on

jätetty tuloksista pois. Osittain nämä erilaiset reitit selittyvät sillä, että Reittiopas käytti antamissaan vaihtoehtoissa myös sellaisia linjoja, joita ei ollut koodattu malliin. Osa eroista selittyy erilaisilla ajoajoilla. Voidaan olettaa, että eroavaisuudet olisivat nyt havaittuja suurempia, mikäli nämä kaikki eri vaihtoehdot otettaisiin mukaan tarkasteluihin.

Testeissä on käytetty samoja nousuvastuksia kuin vuorovälipohjaisessa HELMET-mallissa. Metrolle, junalle ja raitiovaunulle vastus on aina yksi minuutti, kun taas bussin vastus vaihtelee välillä 1-10 minuuttia linjan pituudesta riippuen. Tällä pyritään kuvaamaan sitä, että matkustajien on havaittu suosivan raideliikennettä. Tämä vaikuttaa myös mallin antamiin tuloksiin sellaisilla yhteysväleillä, joissa on valittavana sekä raideyhteys että bussi.

Emme-ohjelmassa joukkoliikenteen aikataulut kuvataan vuorovälin perusteella, joten vuorovälin tai ajoaikojen muuttuessa pitää perustaa aina uusi linja. Etenkin pitkien linjojen, joiden vuoroväli on epäsäännöllinen, kuvaamiseksi vaaditaan siten paljon linjasegmenttejä, joiden määrää rajoitetaan lisenssikoossa. Myös mahdolliset tulevat HSL-kunnat lisäävät aina linjakuvaukseen tarvittavaa segmenttimäärää. Yksittäiseen sijoitteluun tarvittavaa segmenttimäärää voi pienentää jakamalla sijoitteluajanjakso lyhyempiin osiin, kuten luvussa 3.5 kuvatussa Joukkoliikenteen laatumittari –työkalussa tehtiin. Jakaminenkin on kuitenkin työlästä ja kokonaisuus hankalasti hallittavissa, joten menetelmä ei ole erityisen suositeltava. Koko HELMET-mallin alueen joukkoliikennetarjontaa ei siis nykyisen lisenssikoon puitteissa voida kuvata aikataulupohjaisesti.

## 8 Aluetason testit

Edellisessä luvussa kuvatuilla yksittäisten matkojen sijoitteluilla saatiin selville, kuinka mallin antamat reitit vertautuvat suunniteltuihin yhteyksiin. Tällaisia tarkasteluja on hyödyllistä tehdä, kun on tiedossa, mitä yhteysvälejä kannattaa tarkastella. Laajan seudullisen mallin käyttämisessä puolestaan on erityisenä etuna se, että samalla kertaa voidaan tutkia useita erilaisia matkoja. Tällöin saadaan esille myös sellaisia muutoksia, joita ei välttämättä olisi huomannut tarkastella erikseen. Lisäksi tarkastelu on nopeampi toteuttaa, kun useiden yksittäisten yhteysvälien sijoitteluiden sijasta voidaan koko alueen malli sijoitella vain kerran. Aluetason testit rajattiin luvussa 5.3.1 kuvatulle Itä-Helsingin testialueelle.

### 8.1 Aikataulumuutosten vaikutus matka-aikasummaan

Matka-aikasumma kertoo kaikkiin mallin joukkoliikennematkoihin kuluvan yhteenlasketun ajan tarkasteluajavälillä. Tarkastelussa oli siis mukana 1198 Itä-Helsingin sisäistä matkaa aikavälillä 7.15-8.14. Talvikauden 2013-2014 aikatauluilla mallin antama Itä-Helsingin tarkastelualueen matka-aikasumma oli 21253 minuuttia eli 17,7 minuuttia per matka.

Voidaan ajatella, että optimaalinen joukkoliikennejärjestelmä on sellainen, joka minimoi matka-aikasumman eli matkustajien joukkoliikennematkoihin käyttämän ajan. Tällä perusteella erilaisia linjasto- ja aikatauluvaihtoehtoja voidaan verrata matka-aikasumman avulla, joka koostuu kävelyajasta, odotusajasta ja ajoajasta.

Sijoittelu tuottaa kustakin matka-aikakomponentista matriisit, joissa kuvataan matka-aika lähtö- ja määräpaikkapareittain. Matka-aikakomponenttimatriisien summa kuvaa yksittäisen matkan kestoa osa-aluepareittain, ja tämä summa kerrotaan matkamäärät sisältävällä matriisilla, jotta saadaan matkoihin yhteensä kuluva aika (kaava 9). Matka-aikasumma on tämän tulomatriisin nurkkasumma. Vastaavasti voidaan laskea matka-aikasumman komponenttien matkamatriisilla painotetut nurkkasummat, jolloin saadaan kävelyaikasumma, odotusaikasumma sekä ajoaikasumma. Matka-aikasumma on siis

$$T_{summa} = (T_{kävely} + T_{odotus} + T_{ajoneuvo}) * N \quad (11)$$

missä:

$T_{summa}$  = matka-aikakomponenttien summamatriisi

$T_{kävely}$  = kävelyaikamatriisi

$T_{odotus}$  = odotusaikamatriisi

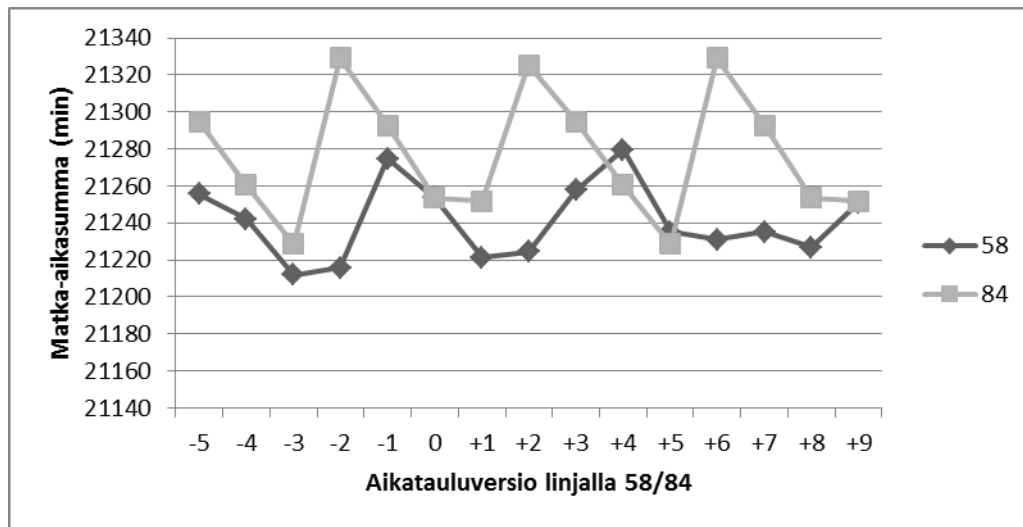
$T_{ajoneuvo}$  = ajoaikamatriisi

$N$  = matkamatriisi.

Sijoittelussa reitinvalinnan perusteena käytetään painotettua matka-aikaa, kuten luvussa 4.3 on kuvattu. Reitinvalinnassa huomioidaan siis mm. eri liikennevälineiden sekä matkan osien erilaiset matkavastuskertoimet. Tuloksia arvioitaessa käytetään kuitenkin yleensä painottamatonta, todellista matka-aikaa, koska ajalle on selkeämmin määriteltävissä arvo. Matka-aikasumman määrittely ei siis sisällä osatekijöiden painotuksia, eli se ei huomioi mm. matkustusmukavuuteen liittyviä tekijöitä, jotka näkyvät reitinvalinnassa esimerkiksi raitioliikenteen pienempinä nousuvastuksina.

Diplomityön tarkasteluissa implisiittinen ja eksplisiittinen odotusaika on jätetty matka-aikavertailuista pois, koska ne eivät täysin vastaa perinteisiä odotus- ja odotteluajan määritelmiä. Lisäksi odotteluajan hyödynnettävyys riippuu mm. matkan tarkoituksesta, eikä sitä siis välttämättä kannata arvottaa samalla tavalla kuin muita matka-aikakomponentteja. Odotteluajoista ei myöskään ole saatavilla aineistoa, sillä Liikku-mistutkimuksessa on kysytty vain matkan lähtöaikaa, ei haluttua lähtöaikaa.

Tässä työssä tutkittiin, voiko matka-aikasummaa vertailemalla löytää optimaaliset jouk-koliikenteen aikataulut. Tämä tarkastelu tehtiin sijoittelemalla mallissa sama kysyntä erilaisilla linjojen 84 ja 58/58B aikatauluilla ja laskemalla näistä vaihtoehtoista matka-aikasummat. Tarkasteltavan linjan kaikkia lähtöjä siirrettiin minuutti kerrallaan välillä -5...+9 minuuttia talven 2013-2014 aikatauluihin verrattuna, ja muiden linjojen aika- taulut pidettiin ennallaan. Sijoittelujen tulokset on esitetty kuvassa 34.



Kuva 34. Linjojen 58 ja 84 matka-aikasumma eri aikatauluvaihtoehtojilla.

Kuvasta havaitaan, että aikataulumuutokset todellakin aiheuttavat muutoksia mallin antamaan matka-aikasummaan. Linjan 84 aikatauluja muutettaessa matka-aikasumma vaihtelee syklisesti siten, että minimikohdan jälkeen summa kasvaa merkittävästi ja laskee jälleen kohti optimaalisempaa kohtaa. Vaihtelussa on havaittavissa kahdeksan minuutin sykli, jonka jälkeen tulokset toistuvat täsmälleen samanlaisina. Tämä selitty- nee sillä, että linjan 84 vuoroväli tarkasteluajankohtana on kahdeksan minuuttia, eli si- joiteltavat aikataulut ovat tällöin täsmälleen samat.

Linjan 84 vaihtelussa on havaittavissa myös neljän minuutin sykli, joka vastaa metron neljän minuutin vuoroväliä tarkasteluajanjaksolla. Tämä tulos vastaa hyvin oletettua, sillä linjaa 84 käytetään metron liityntälinjana. Minimipisteet kuvaavat siis luultavasti aikatauluja, joilla metroon ehtii juuri sopivasti, kun taas tämän jälkeisellä minuutilla matkustaja myöhästyy kyseisestä metrosta ja joutuu odottamaan.

Linjojen 58 ja 58B aikatauluja muutettaessa matka-aikasumma vaihteli myös jonkin verran, mutta muutokset olivat epäsäännöllisempiä ja vaihteluväli pienempi. Vaihtelus- sa oli havaittavissa jonkinlainen viiden minuutin sykli, joka vastaa linjojen 58 ja 58B yhteistä vuoroväliä. Muutamat linjojen lähdöt kuitenkin poikkeavat hieman tästä sään- nöllisestä vuorovälistä, mikä selittää sen, että myöskään matka-aikasumman vaihtelu ei ollut täysin säännöllistä. Erotus lyhimmän ja pisimmän matka-aikasumman välillä oli 68 minuuttia (0,3 %). Linjan 58 aikataulumuutoksilla ei siis vaikuttaisi tarkastelualueel- la olevan yhtä suurta vaikutusta matka-aikasummaan kuin linjalla 84. Testeissä käytetty

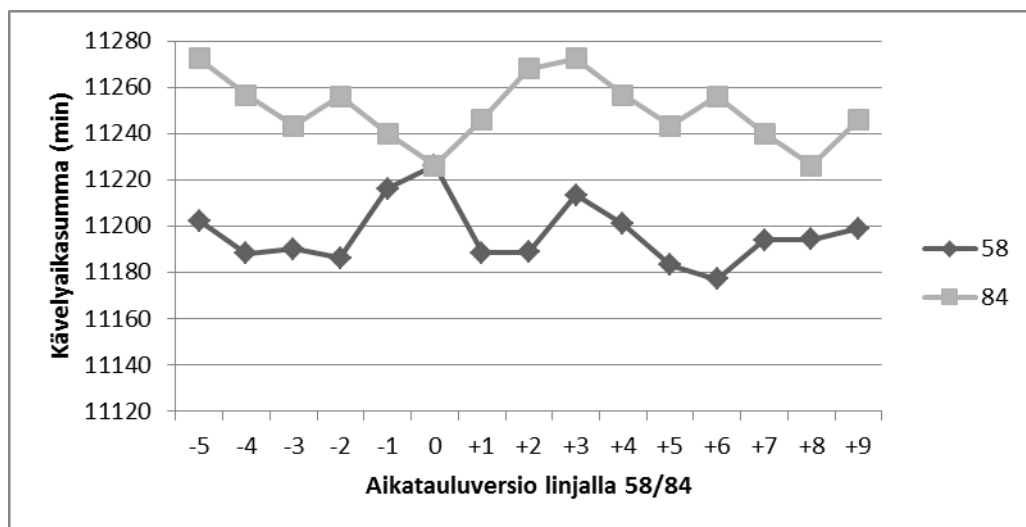
tarkastelualue kattaa kuitenkin vain pienen osan linjan 58 reitistä, ja voidaan olettaa, että laajemmalla tarkastelualueella myös linjan 58 aikataulujen merkitys korostuu enemmän.

Pelkkää matka-aikasummaa tutkimalla on vaikeaa hahmottaa, miten suurista muutoksista on kyse. Tässä on siksi karkeasti pyritty hahmottelemaan, mitä matka-aikasumman muutokset voisivat tarkoittaa. Matka-aikasumma oli linjan 84 erilaisilla aikatauluilla maksimissaan 21 329 minuuttia (vaihtoehto +6 minuuttia) ja pienimmillään 21 228 minuuttia (vaihtoehto +5 minuuttia). Linjalla 84 tehtiin maksimivaihtoehdossa 158 nousua ja koko tarkastelualueella yhteensä 1452 joukkoliikennenosua. Koska muiden tarkastelualueen linjojen aikataulut pysyivät testeissä ennallaan, voidaan olettaa, että saavutetut matka-aikasäästöt kohdistuivat nimenomaan linjan 84 matkustajille. Nousua kohden matka-aikasäästöä kertyi siis maksimissaan  $101 / 158 = 0,64$  minuuttia / nousu. Mallista ei valitettavasti saa tietoa tietyllä linjalla tehtyjen matkojen keskipituuksista, mutta koko tarkastelualueella matkat kestivät keskimäärin 17,8 minuuttia. Mikäli linjan 84 matkat vastaisivat tätä keskimatka-aikaa, ja kullakin matkalla tehtäisiin tasan yksi nousu linjalla, matka-aikasäästöä kertyisi 3,6 % matka-ajasta, minkä voidaan jo ajatella olevan merkittävä säästö.

Linjalla 84 matka-aikasumman kannalta optimaalisin aikataulu olisi tarkastelun perusteella +5 minuuttia talven 2013-2014 aikatauluihin verrattuna. Tämän erotus toiseksi parhaaseen vaihtoehtoon +2 oli 23 minuuttia ja erotus huonoimpaan vaihtoehtoon +6 oli 101 minuuttia (0,5 %). Tarkasteltavia matkoja oli yhteensä 1198, jolloin parhaan ja huonoimman vaihtoehtoon erotus oli 0,084 minuuttia / matka. Vuositasolle laajennettuna (laajennuskertoimella 288) matka-aikasäästöä parhaan ja huonoimman vaihtoehtoon välillä syntyy 29 088 minuuttia, joka ajan arvolla 8,8 €/h tuottaisi 255 500 euron laskennallisen säästön vuodessa (LIVI 2010, LIVI 2011).

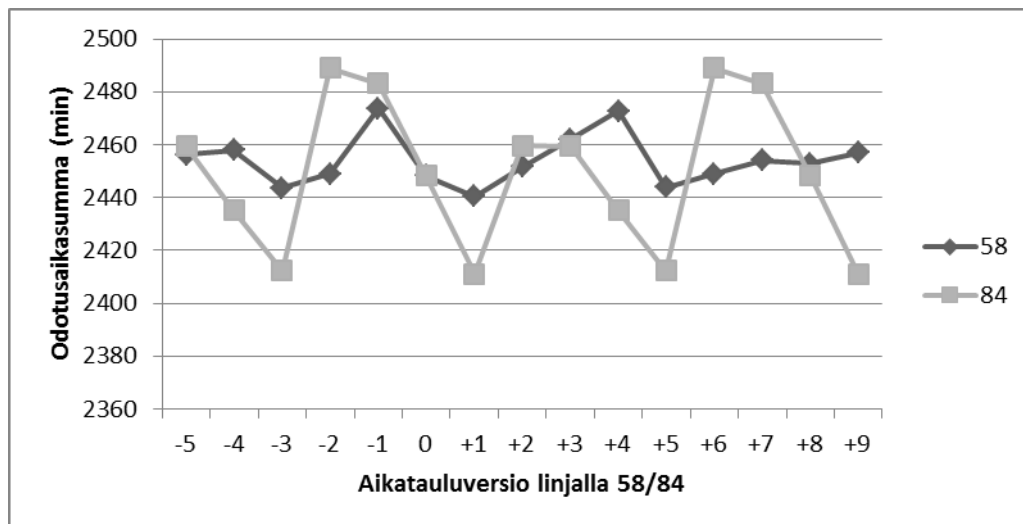
## 8.2 Aikataulumuutosten vaikutus eri matka-aikakomponentteihin

Matka-ajan muodostumista voi tutkia tarkemmin myös matka-aikakomponentteittain, ja edellisen luvun kuvia vastaavat aikatauluversiokohtaiset aikajakaumat komponentteittain on esitetty kuvissa 35-37. Esimerkiksi talven 2013–2014 aikatauluilla (kuvissa kohta 0) kävely aika muodosti matka-aikasummasta 53 %, odotusaika 11 % ja ajoaika 36 %.

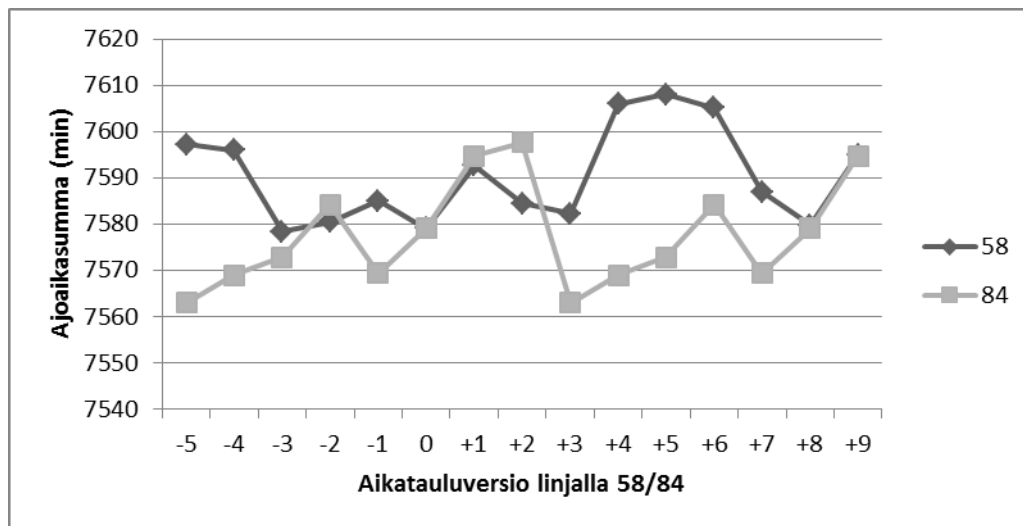


Kuva 35. Linjojen 58 ja 84 kävelyaikasumma eri aikatauluvaihtoehtoilla.





Kuva 36. Linjojen 58 ja 84 odotusaikasumma eri aikatauluvaihtoehtojilla.



Kuva 37. Linjojen 58 ja 84 ajoaikasumma eri aikatauluvaihtoehtojilla.

Linjalla 84 odotetusti myös matka-ajan komponentit noudattivat samaa kahdeksan minuutin sykliä. Kävelyaikasumman vaihteluväli oli 46,26 minuuttia (0,4 %). Myös ajoajan vaihteluväli 34,66 minuuttia oli hyvin samaa suuruusluokkaa (0,5 %). Sen sijaan odotusajan vaihtelu oli prosentuaalisesti kertaluokkaa suurempaa ja myös sen absoluuttinen arvo oli suurempi kuin muiden komponenttien. Erotus pisimmän ja lyhimmän odotusajan välillä oli 77,9 minuuttia eli 3,2 %. Odotusajan voidaan siis olettaa selittävän suurimman osan matka-aikasumman vaihtelusta, ja tämä on havaittavissa myös siitä, että matka-aikasumman ja odotusaikasumman kuvien muoto on hyvin samankaltainen (kuvat 34 ja 36). Odotusajan selitysaste olikin testeissä 0,75.

Linjalla 58 matka-aikakomponenttien vaihtelu oli epäsäännöllisempää kuin linjalla 84, eikä niissä ollut havaittavissa yhtä selkeää viiden minuutin sykliä kuin matka-aikasummassa. Matka-aikakomponenttien vaihtelu oli samaa suuruusluokkaa kuin linjalla 84: kävelyajan ja ajoajan vaihteluväli oli 0,4 %, ja odotusajan vaihteluväli oli 1,4 %. Myös linjalla 58 odotusajan vaihtelut vaikuttivat kuvaajan muodon perusteella selittävän suurimman osan matka-aikasumman vaihtelusta, mutta odotusajan selitysaste oli vain 0,47. Ajoajan selitysaste sen sijaan oli 0,73, eli tärkein matka-aikasumman selittäjä linjalla 58 olikin ajoaika. Matka-aikasummaa eniten selittävä komponentti riippui siis

linjasta. Tämä onkin loogista, sillä eri linjoilla tehdään erityyppisiä matkoja, jolloin matka-aikakomponenttien suhteetkin ovat erilaiset.

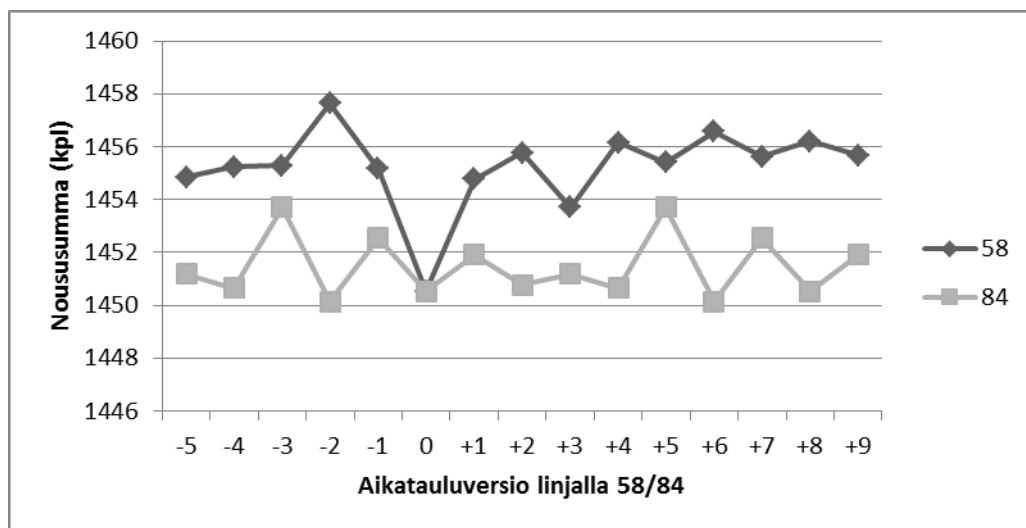
### 8.3 Aikataulumuutosten vaikutus nousumääriin

Toinen tapa tarkastella mallin antamia tuloksia on tutkia muutosten vaikutusta joukkoliikenteen nousumäärään. Nousumäärän kasvu tarkoittaa vaihtojen määrän lisääntymistä, mikä koetaan usein palvelutason heikentymisenä. Suuri nousumäärän lasku voi puolestaan viitata siihen, että linjasto palvelee matkustajia niin huonosti, että joukkoliikenteelle määritellyt matkat tehdäänkin kokonaan kävellen. Tämän vuoksi on syytä tarkkailla, että noususumma ei merkittävästi muutu, mutta kovin tarkasti nousumääriä ei ole tarpeen tarkastella.

Liikenteen sijoittelussa kaikki matkamatriisin matkat tehdään riippumatta siitä, miten hyvin tai huonosti linjasto palvelee kutakin matkaa. Malli valitsee kullekin matkalle matkavastukseltaan pienimmän reitin. Nousumäärä on matkavastuksen yksi komponentti, minkä vuoksi nousumäärien vaihtelu heijastuu myös matka-aikakomponentteihin.

Linjalla 84 noususumma vaihtelee jonkin verran vaihtoehdosta riippuen, ja siinä on samanlainen kahdeksan minuutin sykli kuin matka-aikasummassa. Huomattavaa on etenkin, että matka-aikasumman perusteella optimaalinen aikataulu +5 minuuttia (84+5) on noususumman maksimipiste, ja matka-aikasumman maksimipiste 84+6 puolestaan on optimaalisin noususumman kannalta. Tämä johtunee siitä, että vaihtoehdossa 84+5 tehdään enemmän vaihtoja metroon, koska odotusaika on pieni. Vaihtoehdossa 84+6 taas metrovaihdot eivät enää onnistu, jolloin useampi matkustaja kävelee metromatkan sijaan, mikä kasvattaa matka-aikaa, mutta pienentää nousumäärää. Kokonaisuudessaan nousumäärien vaihtelu on kuitenkin hyvin pientä (0,2 %) ja suurin poikkeama on 2,7 nousua vaihtoehtojen 84+5 ja 84+6 välillä.

Linjan 58 vaihtelu on myös melko pientä, ja erotus pienimmän ja suurimman noususumman välillä on 7,1 nousua (0,5 %). Linjalla 58 noususumman vaihtelu ei vaikuta olevan yhtä jyrkästi matka-aikasumman kanssa päinvastaista kuin linjalla 84, vaan matka-aikasumman kannalta optimaalinen aikataulu -3 minuuttia on keskiarvon tuntumassa myös noususumman osalta.

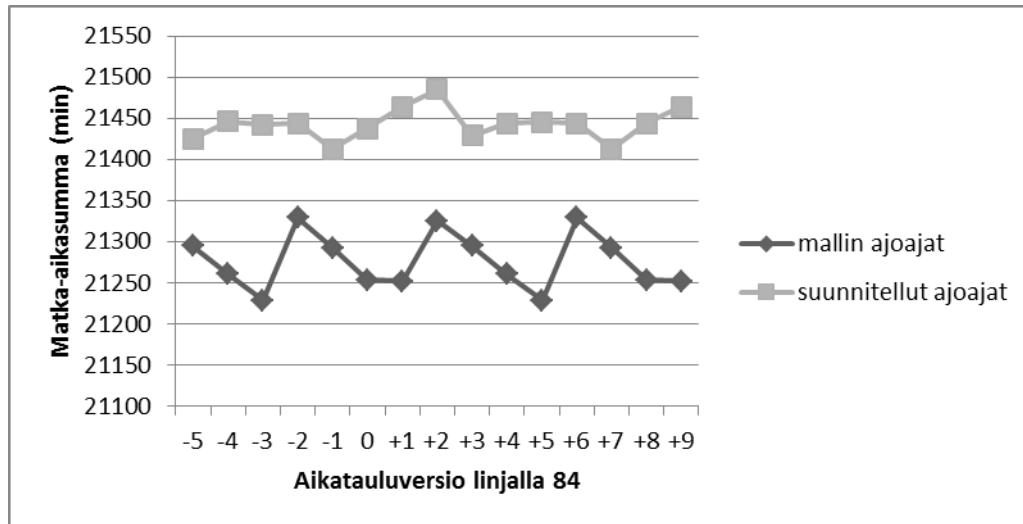


Kuva 38. Linjojen 58 ja 84 noususumma eri aikatauluvaihtoehdoilla.

## 8.4 Ajoaikojen vaikutus tuloksiin

Ajoajan vaikutusta tuloksiin tutkittiin tekemällä samat sijoittelut myös linjakuvauksella, johon tutkittavien linjojen 84 sekä 58 ja 58B ajoajat koodattiin täsmälleen suunnitellun mukaisiksi.

Linjalla 84 oli aluetason tuloksissa havaittavissa selkeä ero verrattuna mallin laskemiin ajoaikoihin, keskimäärin 166 minuuttia (kuva 39). Odotetusti matka-aikasumma oli suunnitelluilla ajoajoilla suurempi kuin mallin laskemilla, sillä kuten luvussa 7 todettiin, malli laskee ajoajat jonkin verran lyhyemmiksi kuin todellisuudessa. Lisäksi matka-aikasumman vaihtelu oli pienempää tarkoilla ajoajoilla.

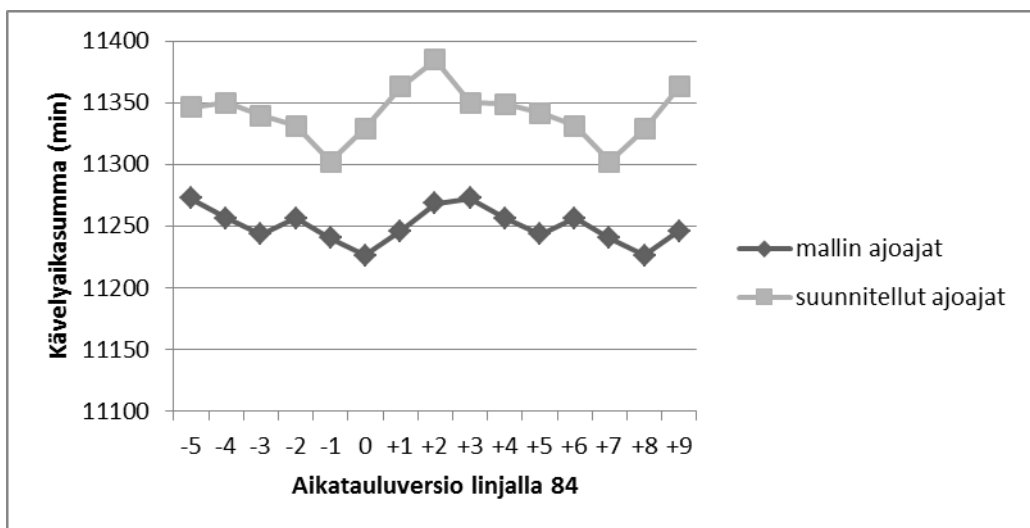


Kuva 39. Linjan 84 matka-aikasumma eri aikatauluvalintoehdoilla mallin laskemilla ja tarkennetuilla ajoajoilla.

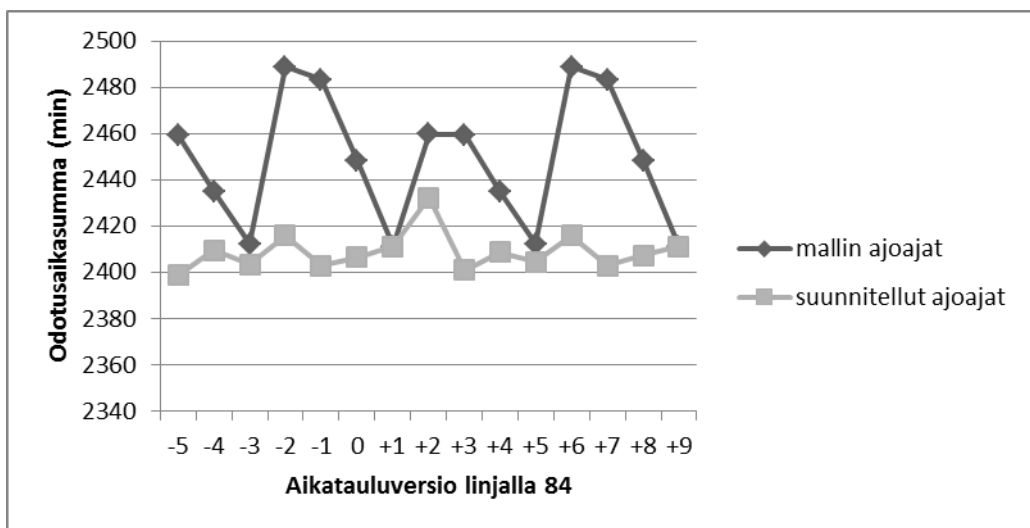
Myös suunniteltuja ajoaikoja käytettäessä matka-aikasumma muodosti aikatauluja muuttaessa sahalaitaa muistuttavan kuvion, jossa on havaittavissa minimi- ja maksimipisteitä. Arvojen vaihtelu ei kuitenkaan ole aivan yhtä säännöllistä tai voimakasta, kuin mallin laskemia ajoaikoja käytettäessä. Muutosten syitä voidaan etsiä tutkimalla matka-aikakomponentteja (kuvat 40-42).

Kävelyaikasumma noudattaa molemmilla ajoaikaversioilla suunnilleen samanlaista muotoa, mutta suunnitelluilla ajoajoilla summa on keskimäärin 91 minuuttia suurempi. Myös ajoaikasumman jakauma on kummallakin ajoaikaversiolla melko samanlainen, mutta jälleen tarkennetuilla ajoajoilla keskimäärin 116 minuuttia suurempi. Ajoaikasumma ja kävelyaikasumma kumoavat jonkin verran toistensa vaihtelua, ja toisen maksimipiste on toisen minimi. Tämä onkin loogista, sillä ajoajan kasvaessa matkustajat pyrkivät säästämään aikaa kävelemällä enemmän.

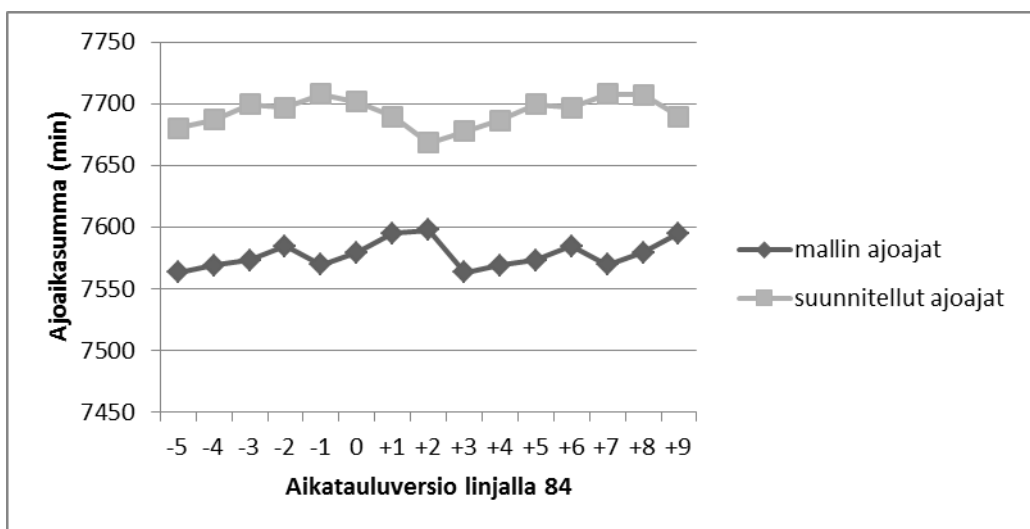
Odotusaikasumma puolestaan säilyy oikeilla ajoajoilla melko vakiona aikataulujen muuttuessa verrattuna mallin ajoajoilla tapahtuvaan voimakkaaseen vaihteluun. Myös tämä ilmiö viittaa siihen, että linjan 84 ajoaikojen kasvaessa matkustajat kävelevät pidemmän matkan käyttäkseen muita, nopeampia linjoja. Tämä havaittiin myös linjakoh-taisissa nousumäärissä, jotka esimerkiksi aikatauluversiolla 0 laskivat 44 nousulla linjal-la 84. Muiden linjojen aikatauluja ja ajoaikoja ei tarkasteluissa muutettu, joten on loo-gista että myös odotusajat tällaisilla matkoilla pysyvät ennallaan.



Kuva 40. Linjan 84 kävelyaikasumma eri aikatauluvaihtoehtoilla mallin laskemilla ja tarkennetuilla ajoajoilla.

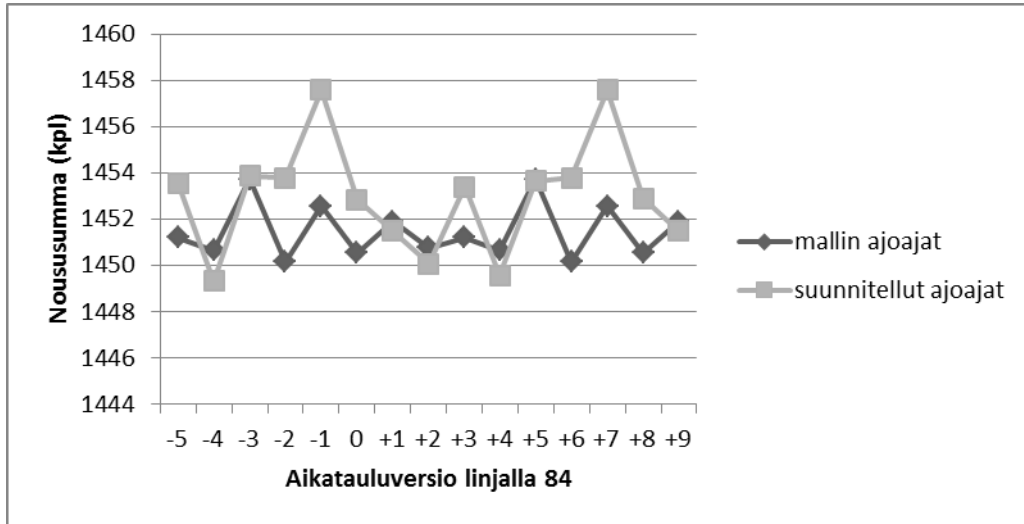


Kuva 41. Linjan 84 odotusaikasumma eri aikatauluvaihtoehtoilla mallin laskemilla ja tarkennetuilla ajoajoilla.



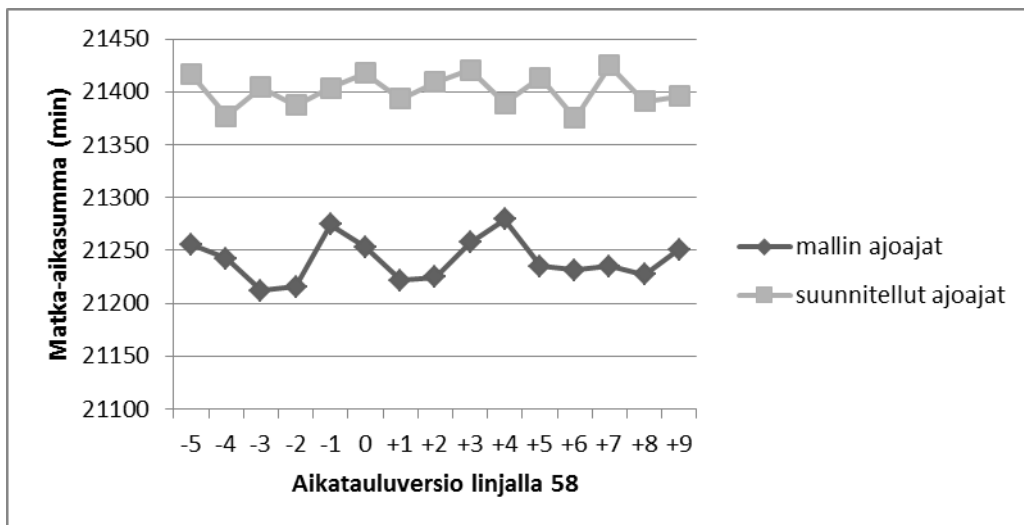
Kuva 42. Linjan 84 ajoaikasumma eri aikatauluvaihtoehtoilla mallin laskemilla ja tarkennetuilla ajoajoilla.

Noususumman vaihtelu (kuva 43) kasvaa tarkoilla ajoajoilla mallin laskemiin verrattuna ja erotus suurimman ja pienimmän arvon välillä on 8,2 nousua (0,6 %). Noususumman ja matka-aikasumman välillä havaitaan jälleen yhteys siten, että nousujen määrä on suurin, kun matka-aikasumma saavuttaa miniminsä. Sama ei kuitenkaan täysin toteudu päinvastoin.

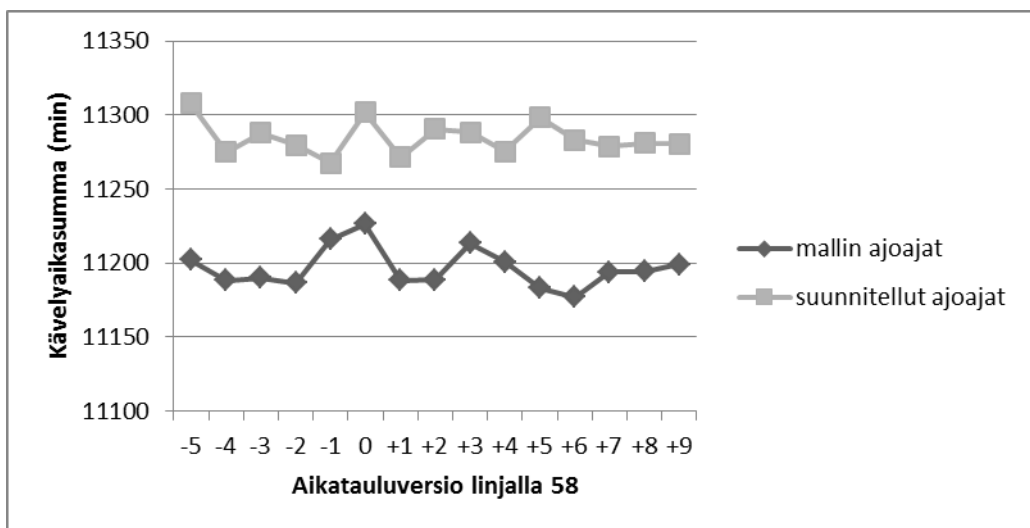


Kuva 43. Linjan 84 noususumma eri aikatauluvaihtoehdoilla mallin laskemilla ja tarkennetuilla ajoajoilla.

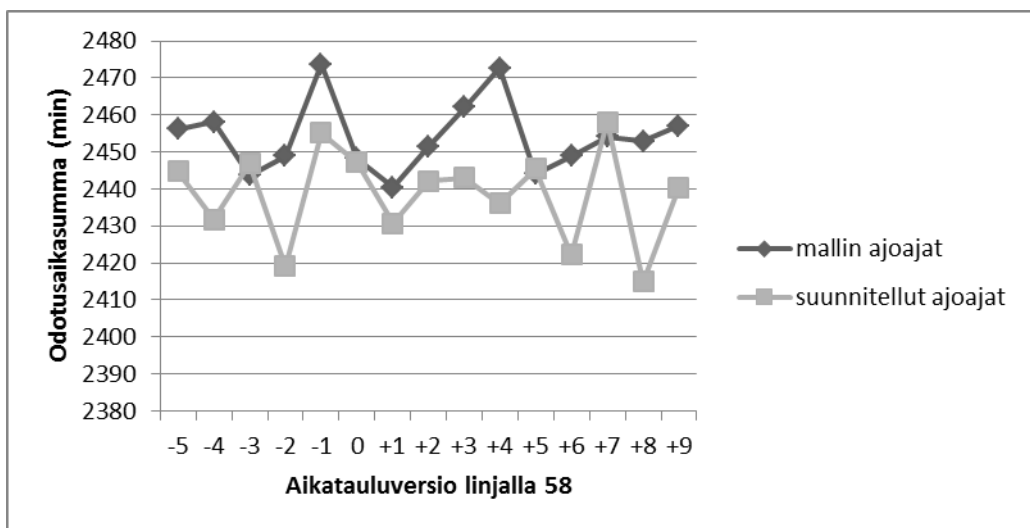
Myös linjalla 58 matka-aikasumman vaihtelu oli pienempää suunnitelluilla ajoajoilla, mutta arvot olivat keskimäärin 160 minuuttia suurempia (kuva 44). Vaihteluväli oli jälleen myös pienempi kuin linjan 84 tuloksissa. Kävelyaika- ja ajoaikasummat noudattelivat samantyyppistä kaavaa kuin linjan 84 tuloksissa, tosin eivät yhtä selvästi (kuvat 45 ja 47). Odotusaika puolestaan vaihteli linjalla 58 tarkoilla ajoajoilla enemmän kuin mallin laskemilla (kuva 46). Osittain tämä johtunee siitä, että tarkennetuissa ajoajoissa itessään on jonkin verran vaihtelua eri kellonaikojen ja aikatauluversioiden välillä, kun taas mallin laskemat ajoajat ovat kaikissa tarkasteluvaihtoehdoissa vakiot. Noususumma on suunnitelluilla ajoajoilla linjan 58 aikatauluja muutettaessa kauttaaltaan pienempi kuin mallin ajoajoilla (kuva 48). Myös linjan 58 ajoaikoja muutettaessa havaittiin 48 nousun siirtymä muille linjoille aikatauluversiolla 0.



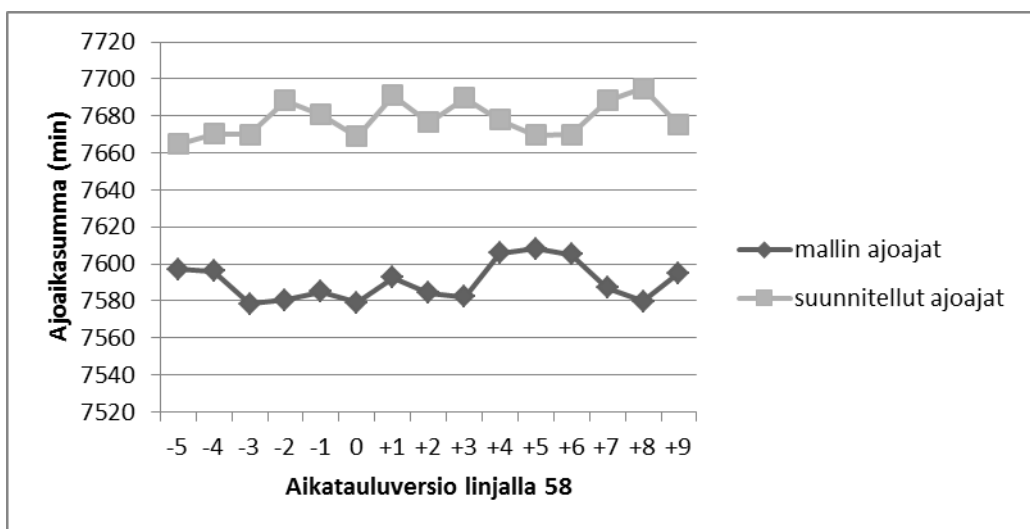
Kuva 44. Linjan 58 matka-aikasumma eri aikatauluvaihtoehdoilla mallin laskemilla ja tarkennetuilla ajoajoilla.



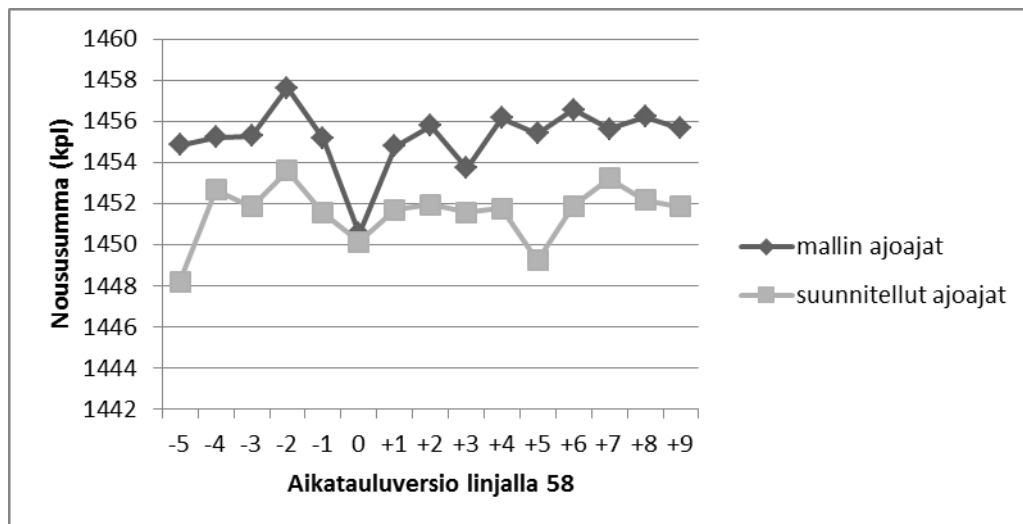
Kuva 45. Linjan 58 kävelyaikasumma eri aikatauluvaihtoehdoilla mallin laskemilla ja tarkennetuilla ajoajoilla.



Kuva 46. Linjan 58 odotusaikasumma eri aikatauluvaihtoehdoilla mallin laskemilla ja tarkennetuilla ajoajoilla.



Kuva 47. Linjan 58 ajoaikasumma eri aikatauluvaihtoehdoilla mallin laskemilla ja tarkennetuilla ajoajoilla.



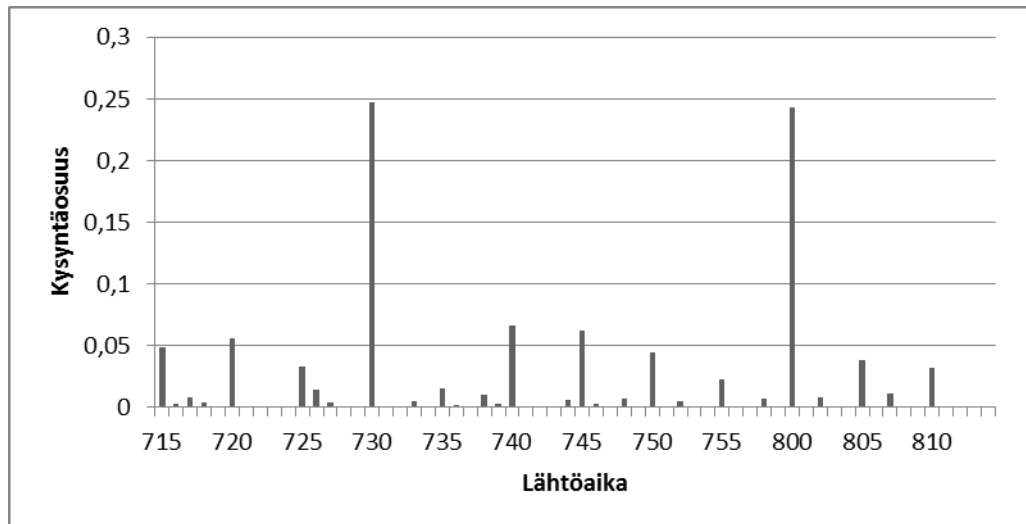
Kuva 48. Linjan 58 noususumma eri aikatauluvaihtoehdoilla mallin laskemilla ja tarkennetuilla ajoajoilla.

Linjojen 84 ja 58 tarkennetut ajoajat eivät ole vertailukelpoisia muiden linjojen mallin laskemien ajoaikojen kanssa, joten saadut tulokset eivät kerro aikataulujen optimipistettä samalla tavalla kuin aiemmissa mallin ajoajoilla tehdyissä tarkasteluissa. Tulosten saamiseksi pitäisikin tarkentaa kaikkien tarkastelualueen linjojen aikataulut samalla tarkkuudella, mikä vaatisi paljon lisätyötä.

Voidaan olettaa, että suunnitellut ajoajat vastaavat todellisuutta paremmin kuin mallin laskemat. Suunnitelluilla ajoajoilla matka-aikasumman minimi kuitenkin sijaitsee eri paikassa, kuin mallin laskemilla ajoajoilla. Tämän vuoksi mallin ajoajoilla saatavaa optimipistettä ei kannata käyttää aikataulusuunnittelussa. Jos suunnittelussa käyttää mallin tuloksia, kannattaa käyttää mallia, johon on tarkennettu suunnitellut ajoajat.

## 8.5 Kysyntämuutosten vaikutus tuloksiin

Ajoaikojen muuttamisen lisäksi sijoitteluilla tutkittiin kysyntämuutosten vaikutuksia saataviin tuloksiin. Aiemmissa testeissä aamuhuipputunnin matriisi on jaettu tasan jokaiselle minuutille, eli joka minuutti sijoitellaan 1/60 huipputunnin matkoista. Lisäksi jakoa tarkennettiin vuoden 2012 Liikkumistutkimuksen aineiston avulla, josta saadaan ilmoitettujen joukkoliikennematkojen alkamisajankohdat ja määrät (kuva 49). Kysyntäaineistosta nähdään, että se on voimakkaasti painottunut tietyille minuuteille. Muun muassa sekä klo 7.30 että 8.00 ilmoitettu matkamäärä on noin neljännes koko tunnin ilmoitetuista matkoista eli yhteensä näillä kahdella minuutilla tehdään noin puolet koko tunnin matkoista. Loput matkoista ovat myös painottuneet minuuteille XX.X0 ja XX.X5, ja näiden minuuttien matkat muodostavat yhteensä 42 % tunnin koko kysynnästä. Lisäksi yhteensä 32 minuutille ei ole ilmoitettu ollenkaan matkoja.



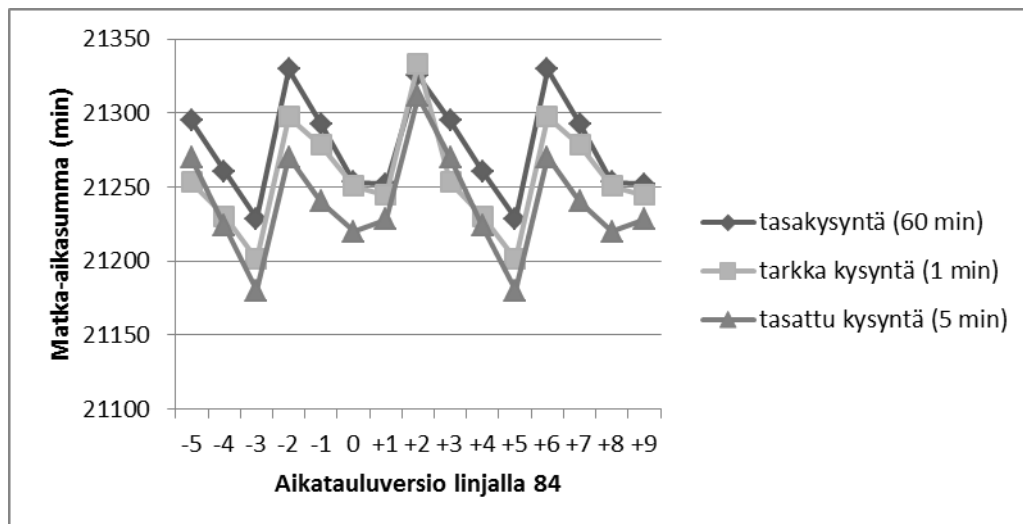
Kuva 49. Joukkoliikennematkojen lähtöaikojen jakautuminen minuuteittain.

Kysyntäaineiston epätasainen jakauma selittyy sillä, että Liikkumistutkimuksen aineisto perustuu matkustajien ilmoittamiin lähtöaikoihin. Lähtöajat helposti mielletään ja pyöristetään tasaminuuteille, vaikka tällaista ei ole erikseen ohjeistettu. Kysyntäaineiston epätasaisen jakauman vuoksi aineistosta laadittiin kaksi erilaista kysyntämallia. Ensimmäisessä mallissa aamuhuipputunnin matriisi jaettiin tarkasti ilmoitettujen alkamisaikojen suhteessa kullekin minuutille. Toisessa vaihtoehdossa kysyntä tasattiin viiden minuutin jaksoissa ilmoitettujen alkamisajankohdienten perusteella, eli esim. 7.15-7.19 alkavat matkat laskettiin yhteen ja kullakin minuutilla tällä aikavälillä sijoiteltiin 1/5 tästä yhteenlasketusta kysynnästä. Tällä pyrittiin tasaamaan alkamisaikoja ilmoitettuihin verrattuna. Liikkumistutkimusaineiston perusteella laskettu kysyntäjako on esitetty liitteessä 1.

Kysyntämuutosten vaikutukset linjan 84 matka-aikasummaan on esitetty kuvassa 50. Kaikilla tutkituilla kysyntämalleilla kuvaajan muoto on melko samankaltainen. Erotus eri kysyntämalleilla saatavien matka-aikasummien välillä on maksimissaan 59,4 minuuttia, kun yksittäisen kuvaajan eri aikatauluversioiden välillä suurin vaihtelu on 132,1 minuuttia.

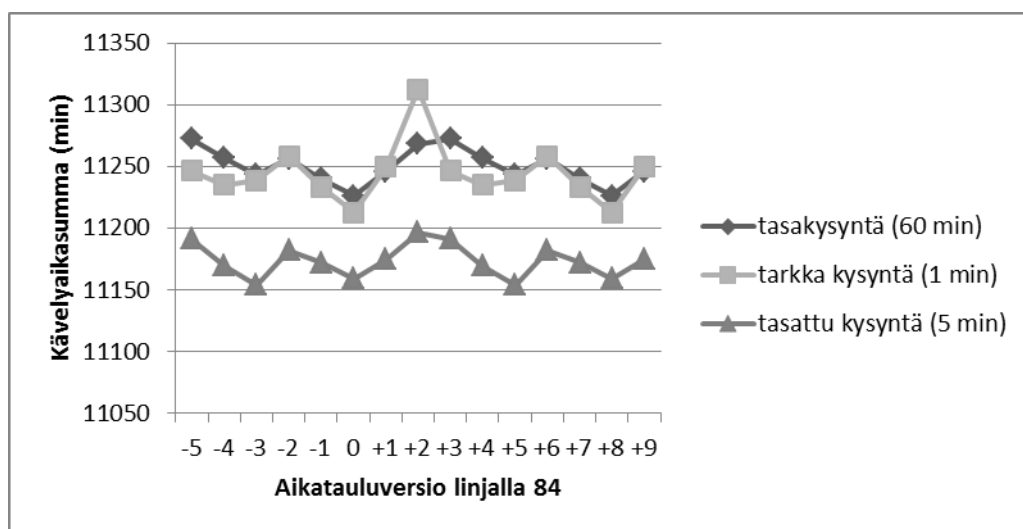
Matka-aikasumman maksimipiste siirtyy tarkennetuilla kysyntämalleilla eri paikkaan tasajakoon verrattuna. Minimikohta on kaikilla kysyntämalleilla sama. Matka-aikasumman vaihtelu on tarkennetuilla kysyntäversioilla suurempaa kuin tasajaolla. Tämä johtunee siitä, että tietyillä ajanhetkillä kysyntä on merkittävästi suurempaa, jolloin näiden ajanhetkien tulokset painottuvat sijoittelussa. Voisi olettaa, että joukkoliikennelähtöjen sijoittuminen kysyntähuippujen tuntumaan vaikuttaisi vieläkin merkittävämmiin tuloksiin. Kuitenkin kuten aiemmin kuvattiin, tällä hetkellä käytettävissä oleva aineisto lähtöajoista on oletettavasti sen verran epätarkkaa, että ei ole mielekäästä analysoida tällä kysyntämallilla saatavaa aineistoa kovin tarkasti.



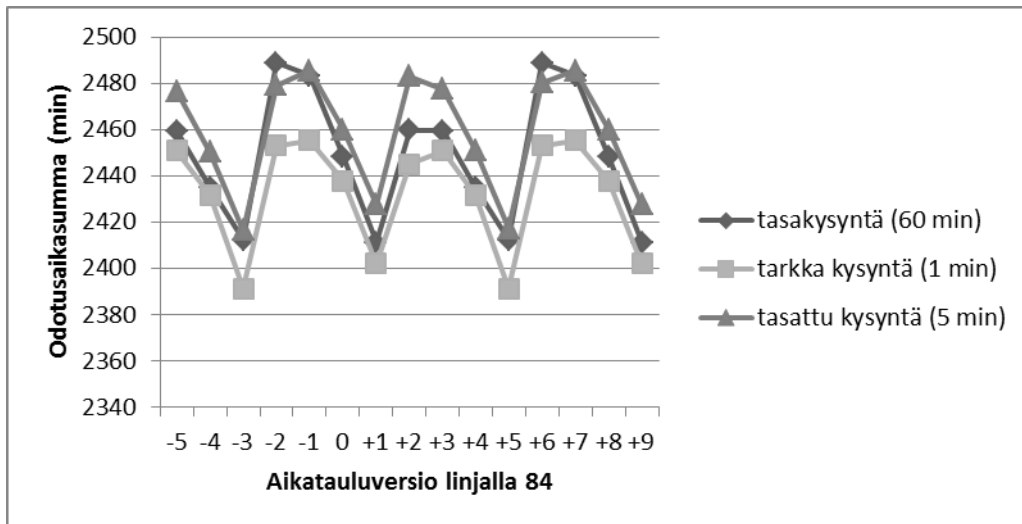


Kuva 50. Linjan 84 matka-aikasumma eri aikatauluvaihtoehdoilla ja eri kysyntävaihtoehdoilla.

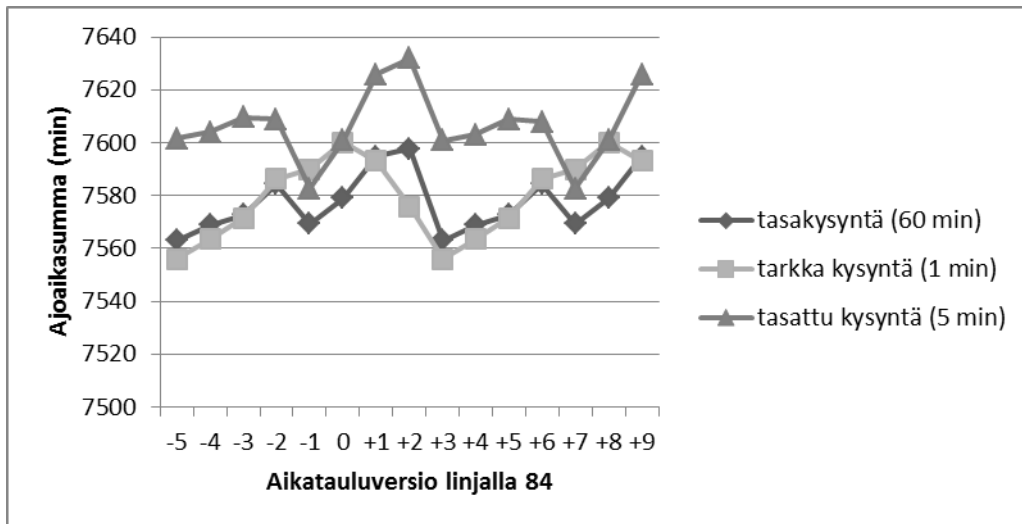
Matka-aikakomponentteittain tarkasteltuna (kuvat 51-53) havaitaan, että kävelyajan ja ajoajan suhteen tarkan kysynnän tulokset muistuttavat hyvin paljon tasajakoa. Tasatulla kysynnällä taas kävelyaika on pienempi ja ajoaika pitempi kuin muilla kysyntämalleilla, mutta kuvaajan muoto on samanlainen kuin tasakysynnällä. Odotusaika on tarkalla kysynnällä jonkin verran pienempi kuin muilla kysyntämalleilla. Sekä tarkalla että tasatulla kysynnällä odotusajan vaihtelu on säännönmukaisempaa kuin tasajaolla, eli ilmeisesti muutokset kysynnässä tasaavat aikataulumuutosten vaikutuksia. Myös nousujen määrän vaihtelu (kuva 54) on tasakysynnällä ja tasatulla kysynnällä hyvin samankaltaista, vaikkakin tasatulla kysynnällä nousumäärä on keskimäärin 7 nousua suurempi. Tarkalla kysynnällä kysyntävaihteluiden ollessa suuria myös nousumäärien vaihtelu on suurempaa.



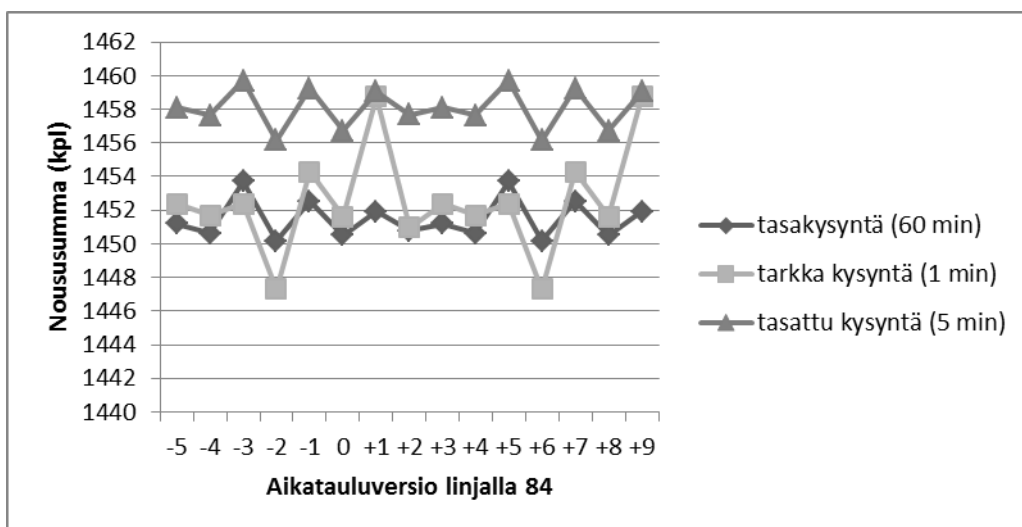
Kuva 51. Linjan 84 kävelyaikasumma eri aikatauluvaihtoehdoilla ja eri kysyntävaihtoehdoilla.



Kuva 52. Linjan 84 odotusaiksumma eri aikatauluvaihtoehtoilla ja eri kysyntävaihtoehtoilla.



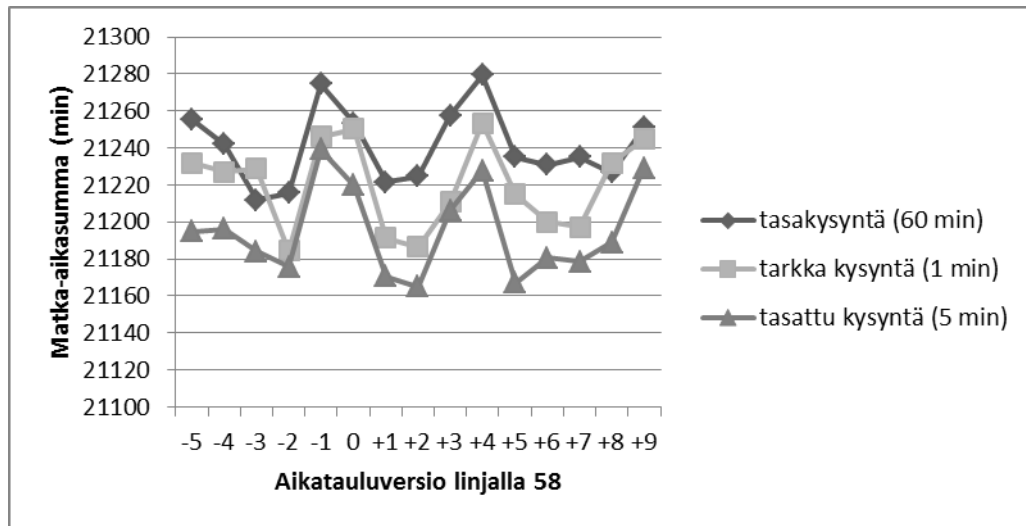
Kuva 53. Linjan 84 ajoaiksumma eri aikatauluvaihtoehtoilla ja eri kysyntävaihtoehtoilla.



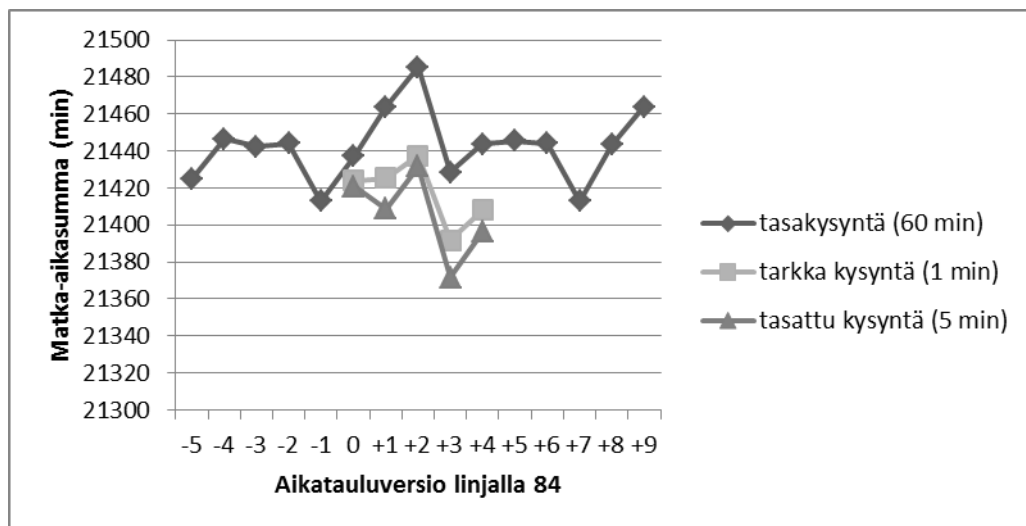
Kuva 54. Linjan 84 nousuajsumma eri aikatauluvaihtoehtoilla ja eri kysyntävaihtoehtoilla.

Linjalla 58 muutokset matka-aikasummassa ovat kysyntämallia muutettaessa samankaltaisia kuin linjalla 84, ja kuvaajan muoto on kaikilla kysyntämalleilla samantyyppinen (kuva 55). Erotus eri kysyntämalleilla saatavien matka-aikasummien välillä on maksimissaan 68,0 minuuttia, kun yksittäisen kuvaajan eri aikatauluversioiden välillä suurin vaihtelu on 68,9 minuuttia.

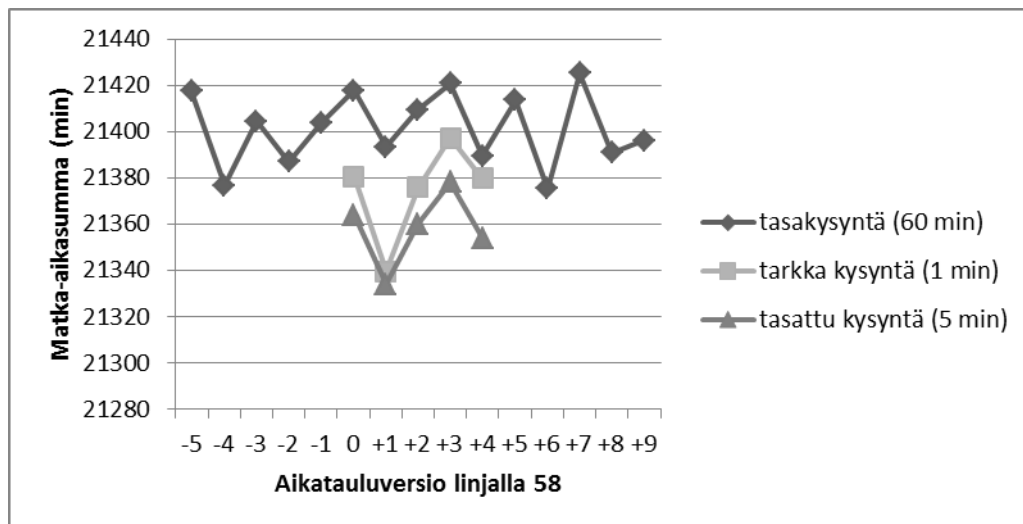
Linjalla 58 kysyntämallin muuttaminen kuitenkin muuttaa matka-aikasumman minimikohtaa, joka on jokaisella kysyntävaihtoehdolla erilainen. Lisäksi tarkalla kysynnällä maksimikohta muuttuu myös. Suppeammat tarkastelut kysynnän vaikutuksesta matka-aikatuloksiin tehtiin lisäksi tarkennetulla ajoaikojen kuvauksella linjoille 84 (kuva 56) ja 58 (kuva 57). Nämä tulokset ovat samansuuntaisia kuin mallin ajoajoilla saadut.



Kuva 55. Linjan 58 matka-aikasumma eri aikatauluvaihtoehdoilla ja eri kysyntävaihtoehdoilla.



Kuva 56. Linjan 84 matka-aikasumma tarkennetuilla ajoajoilla, eri aikatauluvaihtoehdoilla ja eri kysyntävaihtoehdoilla.

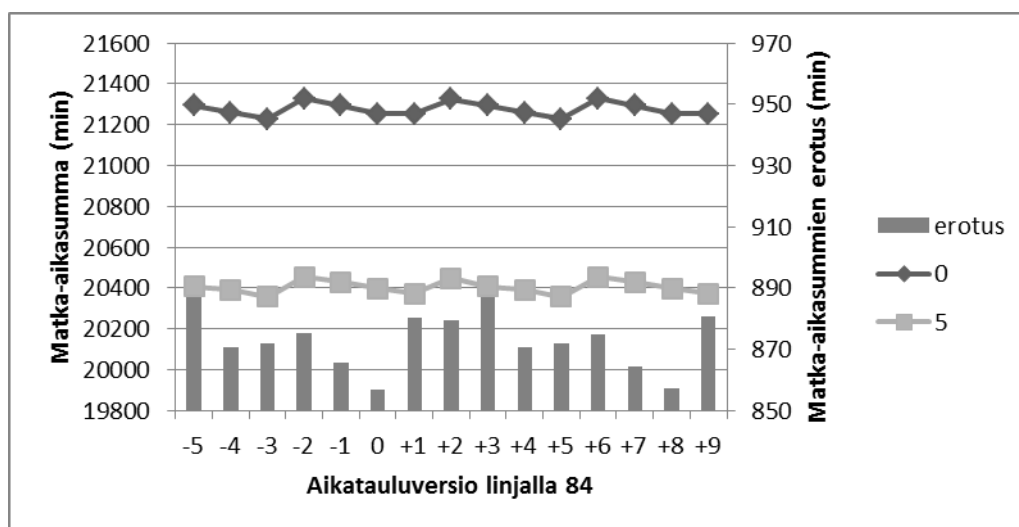


Kuva 57. Linjan 58 matka-aikasumma tarkennetuilla ajoajoilla, eri aikatauluvaihtoehtoilla ja eri kysyntä-vaihtoehtoilla.

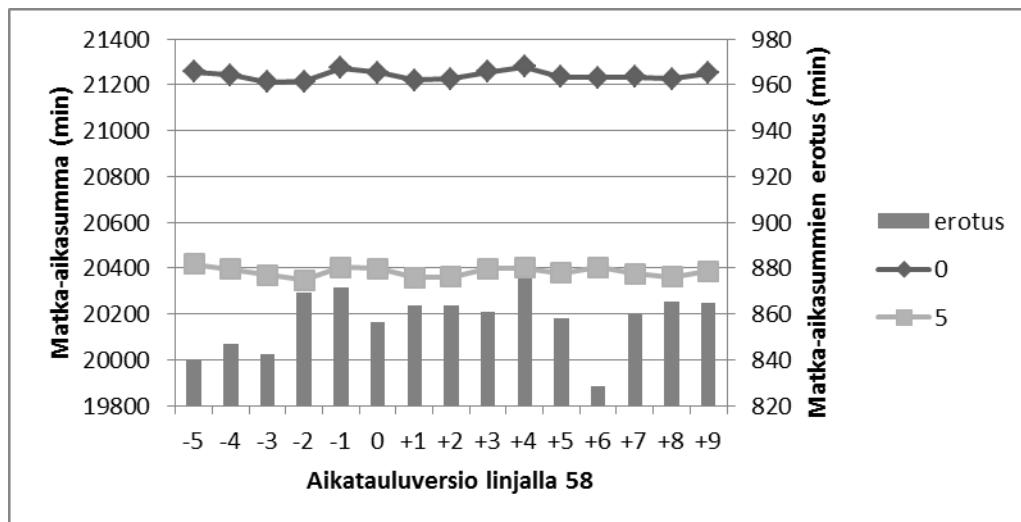
Käytetty kysyntä siis odotetusti vaikuttaa mallin antamiin tuloksiin. Myös kysyntä olisi siis hyvä tuntee melko tarkasti mallitarkasteluja varten. Kuitenkin kaikkien kysyntämallien tulokset ovat ainakin tutkituilla linjoilla sen verran samankaltaisia, että valitsi minimipisteen miltä tahansa käyrältä, sama aikatauluversio ei muillakaan kysyntämallilla ole kovin kaukana minimistä.

## 8.6 Sallitun etuajan ja myöhästymisen vaikutus tuloksiin

Mallilla testattiin suppeasti myös sijoitteluparametrin sallittu etuaja / myöhästymisen vaikutuksia matka-aikatuloksiin. Testisijoitteluisissa käytettiin mallin ajoaikoja ja tasan jaettua kysyntää. Sallituksi etuajaksi ja myöhästymiseksi määriteltiin viisi minuuttia ja etuajan sekä myöhästymisen painokertoimeksi nolla. Eri parametrien sijoittelutulosten vertailu on esitetty kuvissa 58 ja 59.



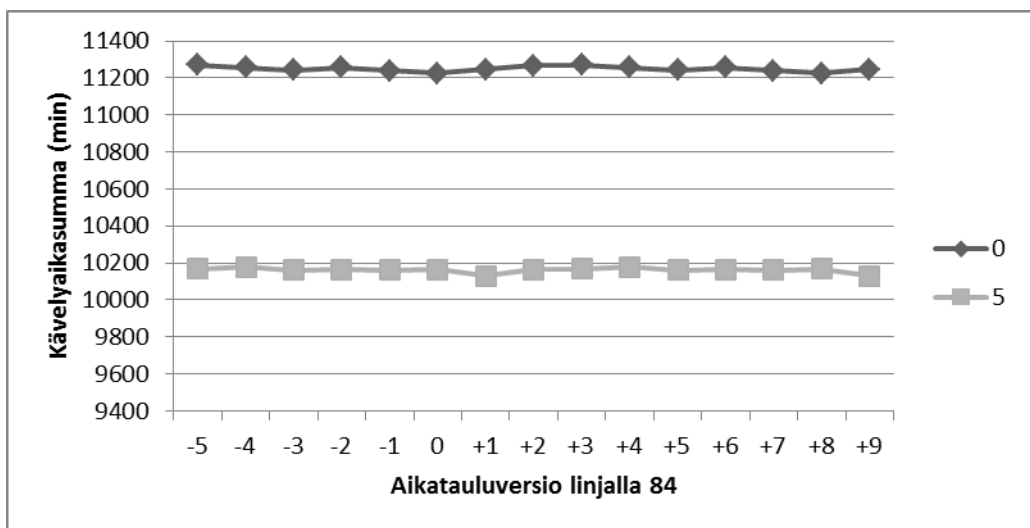
Kuva 58. Linjan 84 matka-aikasumma eri aikatauluvaihtoehtoilla sallitun etuajan/myöhästymisen arvoilla 0 ja 5 sekä käyrien erotus.



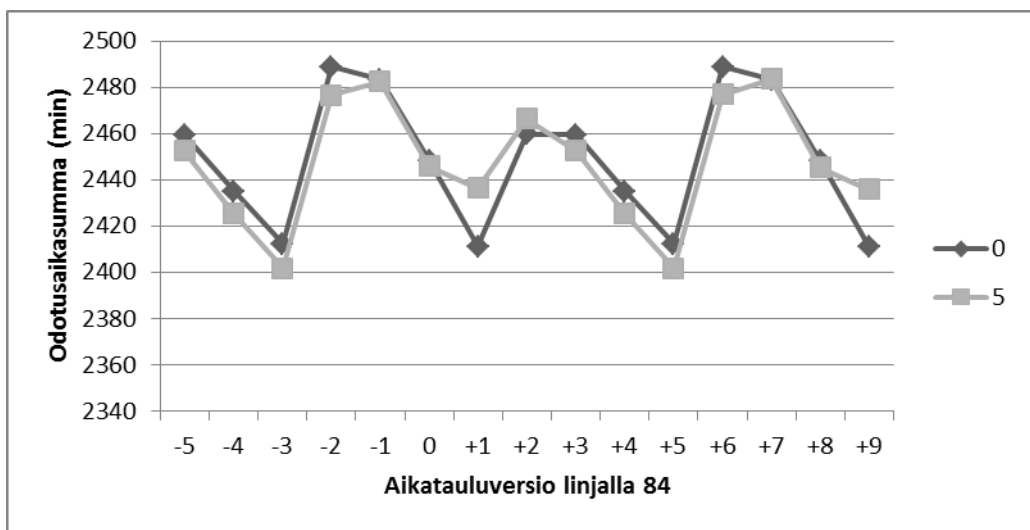
Kuva 59. Linjan 58 matka-aikasumma eri aikatauluvaihtoehdoilla sallitun etuajan/myöhästymisen arvoilla 0 ja 5 sekä käyrien erotus.

Sekä linjalla 84 että linjalla 58 havaittiin, että sallitun etuajan ja myöhästymisen ollessa 5 minuuttia, matka-aikasumma on huomattavasti pienempi kuin arvolla nolla. Matka-aikasumma noudattaa myös samantyyppistä muotoa, kuin parametrilla nolla. Linjalla 84 minimi- ja maksimipisteet säilyvät ennallaan, mutta linjalla 58 molemmat muuttuvat. Myös linjalla 58 tulokset ovat kuitenkin sen verran samankaltaisia, että valitsi minimipisteen kummalta tahansa käyrältä, sama aikatauluversio ei toisellakaan parametrin arvolla ole kovin kaukana minimistä. Matka-aikasumman erotus eri parametrin arvoilla vaihtelee linjalla 84 välillä 857–887 minuuttia ja linjalla 58 välillä 828–879 minuuttia.

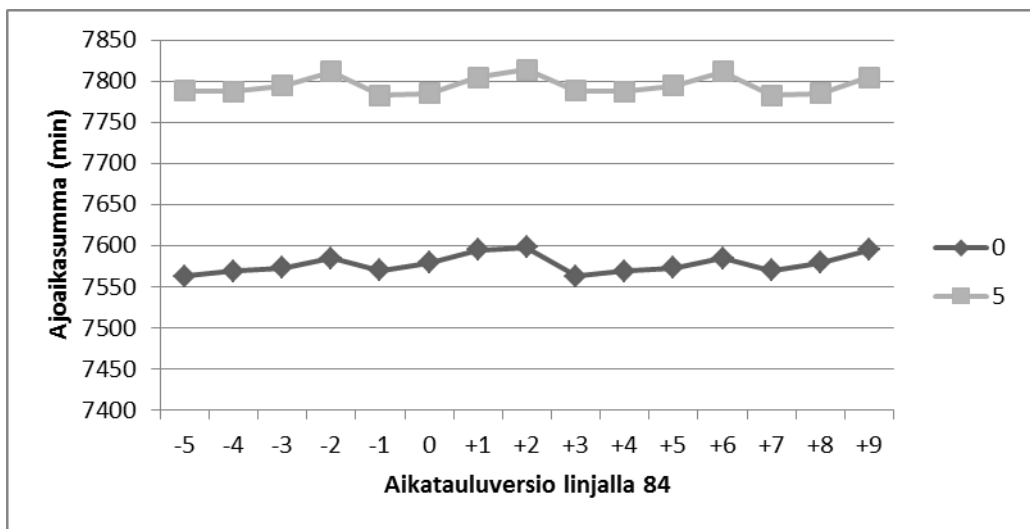
Lähtöajan jouston lisääminen lyhensi siis testeissä matka-aikoja, mikä onkin loogista, sillä tämän jouston ansiosta matkustajat voivat valita hieman eri aikaan lähteviä nopeampia yhteyksiä. Matka-aikakomponentteja tarkastelemalla nähdään, että ajoaika kasvoi hieman, mutta kävelyaika lyheni merkittävästi, mikä selittää matka-aikasumman pienentymisen. Matkustajat minimoivat siis matka-aikaansa kävelemällä vähemmän ja valitsivat lähempää kulkevia linjoja, koska kävelyajan matkavastus on 1,5-kertainen ajoaikaan verrattuna. Odotusajat pysyivät pitkälti ennallaan, eli vaihdot toimivat suunnilleen samalla lailla myös uusilla valituilla reiteillä.



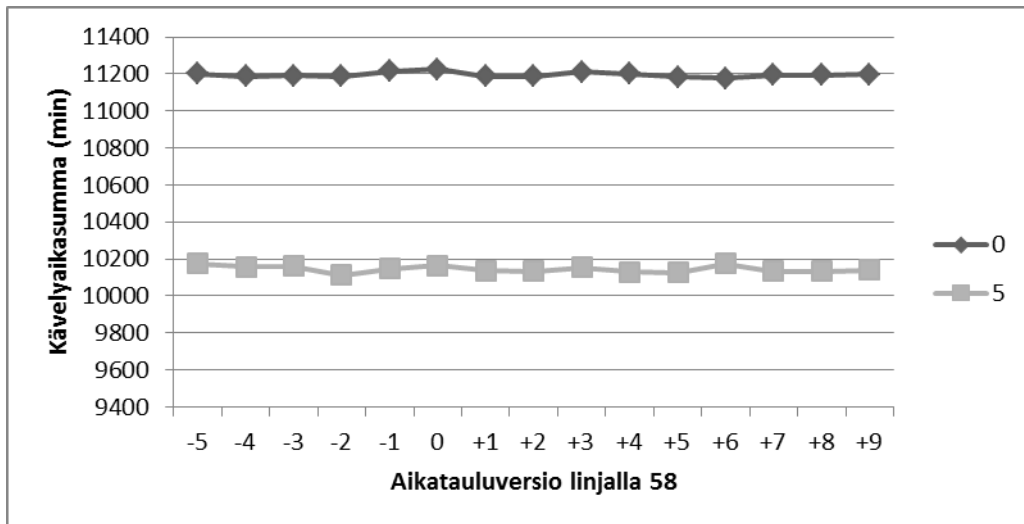
Kuva 60. Linjan 84 kävelyaikasumma eri aikatauluvaihtoehdoilla sallitun etuajan/myöhästymisen arvoilla 0 ja 5.



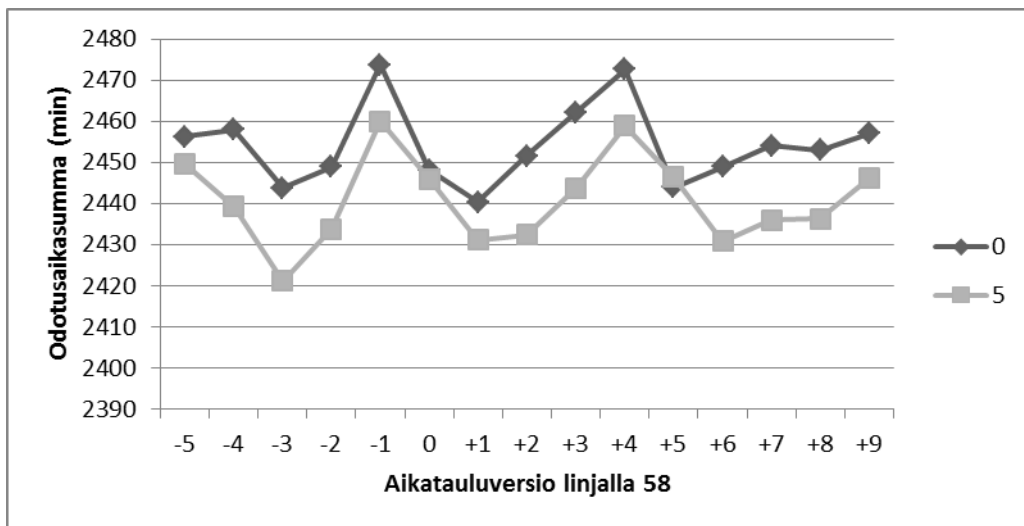
Kuva 61. Linjan 84 odotusaikasumma eri aikatauluvaihtoehdoilla sallitun etuajan/myöhästymisen arvoilla 0 ja 5.



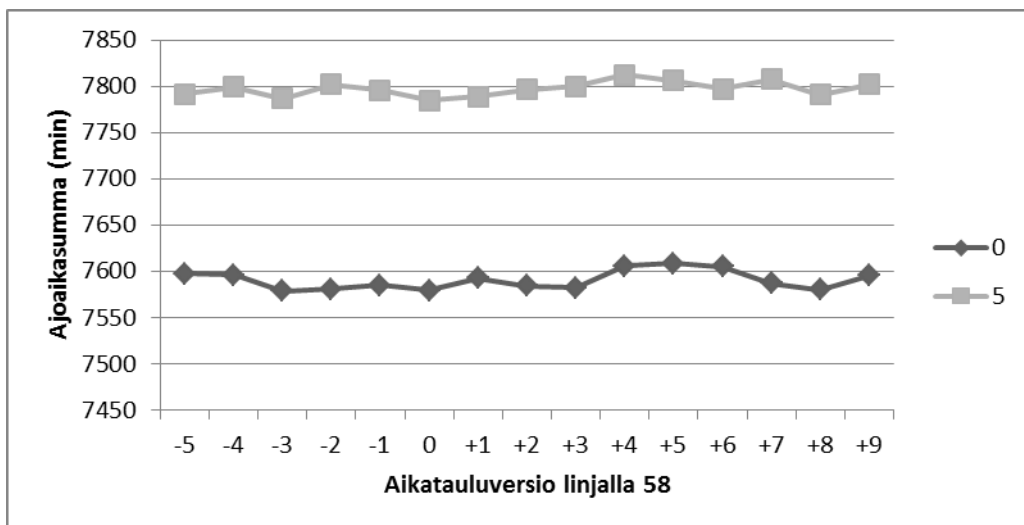
Kuva 62. Linjan 84 ajoaikasumma eri aikatauluvaihtoehdoilla sallitun etuajan/myöhästymisen arvoilla 0 ja 5.



Kuva 63. Linjan 58 kävelyaikasumma eri aikatauluvaihtoehdoilla sallitun etuajan/myöhästymisen arvoilla 0 ja 5.



Kuva 64. Linjan 58 odotusaikasumma eri aikatauluvaihtoehdoilla sallitun etuajan/myöhästymisen arvoilla 0 ja 5.

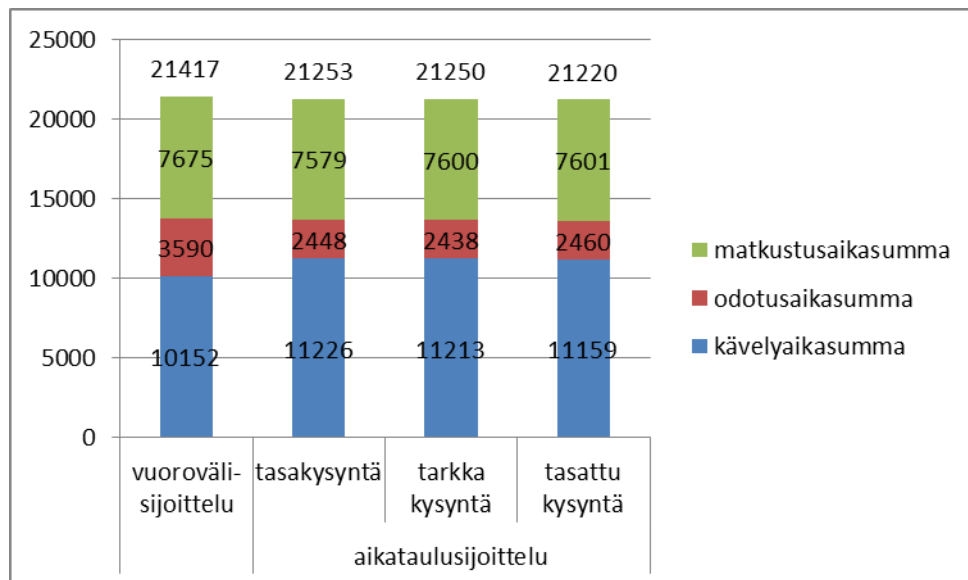


Kuva 65. Linjan 58 ajoaikasumma eri aikatauluvaihtoehdoilla sallitun etuajan/myöhästymisen arvoilla 0 ja 5.

## 8.7 Tulosten luotettavuus

Saatuja sijoittelutuloksia olisi hyvä voida verrata todelliseen kysyntään tuloksien luotettavuuden arvioimiseksi. HSL:n HELMET-malli on kalibroitu tietyissä mittauspisteissä havaittujen matkustajamäärien perusteella ja vastaavaa analyysiä voisi tehdä myös aikataulusijoittelun tuloksista. Tässä diplomityössä tarkastelualue kuitenkin rajoittuu vain luvussa 5.3.1 kuvatun Itä-Helsingin testialueen sisäisiin matkoihin, josta ei ole olemassa vastaavaa mittausaineistoa todellisista matkamääristä. Tällaista vertailua ei siis käytettävissä olevan aineiston perusteella voi tehdä.

Myöskään aikataulusijoittelusta ei HSL-alueella ole aiempaa kokemusta, johon tuloksia voisi verrata. Karkeaa vertailua saatettiin kuitenkin tehdä HELMET-mallin vuorovälisijoittelun kanssa, ja näitä tuloksia on esitetty kuvassa 66. Vuorovälisijoittelun matka-aikasumma oli melko lähellä aikataulusijoittelun eri kysyntävaihtoehtoja. Poikkeama oli suurimmillaan 197 minuuttia eli 0,9 %. Myös ajosajan suhteellinen poikkeama oli samaa suuruusluokkaa. Kävelyajassa ja etenkin odotusajassa erot olivat kuitenkin huomattavasti suurempia. Kävelyajan poikkeama oli suurimmillaan noin 10 % ja odotusajan suurin poikkeama oli 47 %.



Kuva 66. Eri sijoittelujen tulosten vertailu talvikauden 2013-2014 aikatauluilla.

Kävely- ja ajoajan eroavaisuudet selittyvät luultavasti sillä, että matkustajien käyttämät reitit ovat hieman erilaisia sijoittelualgoritmien eroista johtuen. Odotusaika taas lasketaan vuorovälisijoittelussa eri tavalla kuin aikataulusijoittelussa, minkä vuoksi myös saatu tulos on erilainen. Vuorovälisijoittelussa odotusaika lasketaan houkuttelevien linjojen vuorovälien ja odotusaikakertoimen perusteella, kun taas aikataulusijoittelussa odotusaika perustuu todelliseen dataan linjojen saapumisajoista. Aikataulusijoittelun matka-aikaan ei tässä ole laskettu mukaan implisiittistä ja eksplisiittistä odotusaikaa, sillä ne eivät täysin vastaa perinteisiä odotus- ja odotteluajan käsitteitä. Matkan alkuodotukseen on siis laskettu vain yhden minuutin minimiodotusaika, sillä algoritmi olettaa matkustajan ja joukkoliikennevuoron saapuvan pysäkillä täsmällisesti aikataulujen mukaisesti. Tämä selittää osaltaan, miksi odotusajakasumma on pienempi kuin vuorovälisijoittelussa.

Kokonaisuutena aikataulusijoittelun antamat matka-ajat ovat kuitenkin sen verran lähellä vuorovälisijoittelun tuloksia, että voidaan olettaa aikataulusijoittelun toimivan suunnitteen toivotulla tavalla.



## 9 Johtopäätökset

### 9.1 Yhteenveto

Diplomityön tavoitteena oli selvittää, voiko liikennemalleja käyttää joukkoliikenteen aikataulusuunnittelun apuvälineenä. Työssä tutkittiin, millaisia keinoja ja työkaluja aikataulujen suunnitteluun ja arviointiin on olemassa. Pääpaino työssä oli liikennemallien tutkimuksella, jolla selvitettiin sijoittelun mahdollisuuksia aikataulujen vertailussa sekä eri malliohjelmien soveltuvuutta aikataulupohjaisiin tarkasteluihin. Lisäksi tutkittiin, kuinka hyvin aikataulusijoittelun tulokset vastaavat todellisuutta sekä miten eri tekijät vaikuttavat tuloksiin.

Aikataulujen suunnittelua ja arviointia sekä liikennemallien ominaisuuksia selvitettiin työssä aluksi kirjallisuuden avulla. Lisäksi kokemuksia joukkoliikenteen suunnittelusta ja liikennemallien käytöstä kerättiin kyselytutkimuksen avulla muilta eurooppalaisilta joukkoliikenneviranomaisilta. Myös kokemuksia Visum-liikennemalliohjelmasta kerättiin haastattelemalla ohjelmaa käyttäneitä asiantuntijoita.

Kyselytutkimukseen vastanneissa kaupungeissa ei ole käytetty liikennemalleja aikataulusuunnittelun tukena. Eräs vastaaja perusteli tätä sillä, että mallien antamat kuormitus-tiedot ovat liian epätarkkoja. Yhdessä kaupungissa kuitenkin on rakenteilla Visum-malli, jota voisi käyttää myös aikataulusuunnitteluun. Lisäksi kaksi vastaajaa kertoi muista aikataulujen arviointiin käytettävistä työkaluista, ja kaksi vastaajaa tekee arviointia käsityönä. 17 vastanneesta kaupungista ainoastaan yhdeksässä viranomainen suunnittelee aikataulut itse, mikä varmasti vaikuttaa siihen, miksi monilla vastaajista ei ole käytössä työkaluja aikataulujen arviointiin.

Visum-ohjelmassa todettiin kirjallisuus- ja haastattelututkimuksen perusteella olevan joitakin sellaisia toimintoja, joita Emmessä ei ole käytettävissä. Esimerkiksi aikataulusijoitteluun on käytettävissä lyhimmän polun menetelmän lisäksi myös branch & bound –menetelmä, joka hakee tarkasteluajanjaksolta useita yhteysvaihtoehtoja vain yhden vaihtoehdon sijasta. Matkustajat jaetaan saatujen reittivaihtoehtojen välille valintamallilla, joita on Visumissa käytettävissä useita erilaisia logittimallin lisäksi. Tampereen Visum-mallissa esimerkiksi on käytetty branch & bound –sijoittelua ja Kirchhoffin reitinvalintamallia. Visumin aikataulusijoittelussa on mahdollista myös huomioida linjan kapasiteetti, painottaa vaihtoaikaa suhteessa optimiin sekä arvioida matkan alkuodotusta funktiolla, joka perustuu joukkoliikenteen vuoroväleihin tai aikatauluihin. Näiden ominaisuuksien vuoksi Visumia voisi olla mielenkiintoista tutkia käytännössä ja verrata tuloksia Emmellä saatuihin.

Diplomityön osana toteutettiin myös käytännön testejä Emme-ohjelmalla HSL:n HEL-MET-mallilla. Testien tarkoituksena oli selvittää, kuinka hyvin aikataulusijoittelusta saatavat tulokset vastaavat todellisuutta sekä miten eri tekijät vaikuttavat mallituloksiin. Testeillä kerättiin tietoa myös aikataulusijoittelun vaatimista lähtötiedoista ja työmäärästä.

Vertailu suunniteltuihin aikatauluihin toteutettiin sijoittelemalla yksittäisiä matkoja Emmellä ja vertaamalla saatuja tuloksia suunniteltuihin aikatauluihin. Näissä reittiver-tailutesteissä havaittiin, että aikataulusijoittelulla saatavat kokonaismatka-ajat poikkesi-vat suunnitelluista aikatauluista keskimäärin noin yhdeksän prosenttia. Suurimmat erot olivat kävelyajoissa (19 %) sekä bussilinjojen ajoajoissa (18 %). Mallin havaittiin aliar-vioivan hieman kokonaismatka-aikoja sekä kävelyaikoja. Vaihtoaikoja malli puolestaan

hieman yliarvioi. Kävelyaikojen eroavaisuudet selittyvät ainakin osittain mallin liikenneverkon kuvauksen epätarkkuudella. Vaihtoaikojen erillistarkastelu taas ei ole kovin mielekäästä, sillä vaihtoaajat ovat riippuvaisia muista matka-aikakomponenteista.

Selkein ero suunniteltuihin aikatauluihin nähden havaittiin ajoajoissa, joita malli aliarvioi paikoin merkittävästi (jopa 27 %). Myös Trafix (2013) on todennut mallin aliarvioivan ajoaikoja ja että suhteellista virhettä on ajoajoissa melko paljon. Ajoajat muodostavat suurimman osan kokonaismatka-ajasta, joten niiden vaikutus kokonaismatka-aikojen eroavaisuuksiin on merkittävin. Ajoajat vaikuttivat myös eniten mallin valitsemiin reittivaihtoehtoihin. Ajoaikojen eroavaisuudet johtuvat erilaisesta laskentatavasta: mallissa ajoaika määräytyy muun liikenteen nopeudesta funktioiden avulla, ja vertailussa käytetyt suunnitellut ajoajat puolestaan perustuvat mittausdataan toteutuneista ajoajoista. Myös näissä käytetty persentiili on erilainen, minkä vuoksi ajoajat eivät ole täysin vertailukelpoisia. Malli pyrkii kuvaamaan keskimääräistä tilannetta eli persentiiliä 50, kun taas aikataulut suunnitellaan persentiilin 40 mukaan. Mallin ajoaikojen virhe verrattuna ajoaikamittausten persentiiliin 50 olisi siis todennäköisesti vielä suurempi kuin nyt havaittu.

Havaitun virheen vuoksi ajoaikoja on syytä tarkentaa hyvin tarkkoja tarkasteluja, kuten aikataulusijoittelua, varten. Mallilla saatiin testatulla yhteysvälillä täsmälleen samanlaisia yhteyksiä kuin Reittioppaalla, kun malliin syötettiin suunniteltuja vastaavat ajoajat. Aikataulujen ja etenkin ajoaikojen tarkentaminen malliin on hyvin työlästä ilman automatisoitua menetelmää. Myös automatisoinnin edellyttämien lähtötietojen (mallin ja Hastuksen pysäkkien vastaavuus) kerääminen on työläs kertaluontoinen urakka ja tiedot vaativat säännöllistä ylläpitoa. Emmen aikataulupohjainen linjastokuvaus vaatii paljon segmenttitilaa, ja nykyinen lisenssikoko ei riitä HSL-alueen aikataulupohjaiseen kuvaukseen. Lisenssikoon kasvattamisen haittana on ohjelman käyttökustannuksien kasvu.

Aluetason testeissä tutkittiin Itä-Helsingistä rajatulla tutkimusalueella aikataulu-, kysyntä-, ja ajoaikamuutosten sekä sallitun etuajassa tai myöhässä olon vaikutuksia mallin antamiin tunnuslukuihin. Tutkimusalueella kulki 28 HSL:n joukkoliikennelinjaa ja siellä tehtiin mallin mukaan 1198 matkaa aamuhuipputunnissa. Testien perusteella ajoaikojen tarkentaminen muutti tuloksia merkittävämmiin kuin käytettävä kysyntämalli. Etuajassa tai myöhässä matkustamisen salliminen muutti myös merkittävästi matka-aikasummaa, mutta kuvaajan muoto säilyi melko samankaltaisena.

Testeissä muutettiin kahden linjan aikatauluja. Tarkasteluissa havaittiin, että aikataulumuutokset muuttavat matka-aikasummaa ja sen komponentteja, sekä nousumääriä. Mallin ajoaikoja käytettäessä matka-aikasummassa havaittiin syklisyyttä, joka oli linjan 84 aikataulumuutoksissa voimakkaampaa ja linjan 58 aikataulumuutoksissa heikompa. Vaihtelun jaksot vaikuttivat näissä testeissä vastaavan linjojen vuorovälejä, ja linjalla 84 lisäksi metron vuoroväliä. Linjalla 84 samaa syklisyyttä oli havaittavissa myös matka-aikakomponenteissa, mutta linjan 58 tuloksissa heikommin. Linjan 84 aikatauluja muuttaessa merkittävin matka-aikasummaa selittävä tekijä oli odotusaika ja linjalla 58 ajoaika. Noususummassa linjalla 84 havaittiin kahdeksan minuutin sykli, mutta linjalla 58 ei havaittu syklisyyttä.

Ajoaikojen vaikutusta tuloksiin tutkittiin tarkentamalla kahdella testilinjalla ajoajat vastaamaan talvikauden 2013-2014 suunniteltuja ajoaikoja. Ajoaikojen tarkentaminen kasvatti odotetusti testeissä huomattavasti matka-aikasummaa, sillä mallin ajoajat olivat lyhyempiä kuin suunnitellut. Ajoaikojen tarkentaminen myös pienensi testeissä matka-aikasumman vaihtelua. Kävelyaika- ja ajoaikasummat kasvoivat, kun taas odotusaika lyheni ajoaikojen tarkentamisen myötä. Noususumma käyttäytyi eri linjoilla eri tavalla.

Tarkennetuilla ajoajoilla saadut tulokset eivät ole täysin vertailukelpoisia mallin ajoajojen tulosten kanssa, sillä ajoaikoja tarkennettiin kussakin tarkastelussa vain yhdelle linjalle muiden pysyessä ennallaan. Tarkennuksessa tutkittavien linjojen ajoajat kasvoivat huomattavasti, mikä aiheutti siirtymää muille linjoille, joiden ajoajat säilyivät ennallaan ja lyhyempinä. Täsmällisemmän vertailun toteuttamiseksi ajoajat tulisivatkin tarkentaa samalla menetelmällä kaikille tarkastelualueen linjoille, jotta tällaista vääristymää ei esiintyisi.

Kysyntämuutosten vaikutuksia selvitettiin tekemällä samat sijoittelut tasakysynnän lisäksi voimakkaasti vaihtelevaan kyselyaineistoon perustuen sekä tasaamalla kyselyaineistoa viiden minuutin jaksoissa. Eri kysyntämalleilla kuvaajien muoto säilyi melko samankaltaisena, ja linjalla 84 myös matka-aikasumman minimipiste säilyi samana kaikissa kysyntävaihtoehtoissa. Linjalla 58 minimipiste oli jokaisella kysyntämallilla eri aikatauluversiolla. Kysyntämalli voi siis muuttaa tuloksia, mutta ero matka-aikasummassa eri kysyntämallien välillä oli melko pieni.

Mallilla tutkittiin myös sallitun etuajassa olon ja myöhästymisen vaikutusta parametrin arvolla 5 minuuttia. Tämä antaa matkustajille mahdollisuuden valita lähtöaikansa vapaammin. Odotetusti näissä testeissä matka-aikasumma jäi merkittävästi pienemmäksi, sillä matkustajat voivat sovittaa lähtöaikansa sujuvimpiin joukkoliikennevuoroihin. Testeissä havaittiinkin, että matkustajat pyrkivät minimoimaan matkavastusta kävelemällä vähemmän ajoajan hieman lisääntyessä.

## **9.2 Päätelmät**

Tutkimuksissa ei saatu yksiselitteistä vastausta siihen, voiko aikataulusijoittelua hyödyntää aikataulusuunnittelussa. Aikataulumuutosten havaittiin testeissä muuttavan matka-aikasummaa, ja matka-aikasumman muutokset suhteessa eri tekijöihin vaikuttivat loogisilta. Testeissä ei tullut esille sellaisia puutteita, jotka estäisivät aikataulusijoittelun käytön. Tehtyjen tarkastelujen perusteella ei kuitenkaan voi vielä tehdä yleistettyjä johtopäätöksiä menetelmän toimivuudesta aikataulusuunnittelussa.

Aikataulusijoittelumalli pitää sisällään kaikki Ojalan ja Pursulan (1994) listaamat perinteiset matkan osavaiheet, eli voidaan olettaa, että kaikki tärkeimmät matka-aikaa selittävät komponentit ovat mallissa edustettuina ja malli on siltä osin sopivan tarkka. Reitti-vertailutesteissä havaittiin, että aikataulusijoittelu löytää realistisia reittejä, joista monet vastaavat hyvin Reittioppaan antamia suunniteltujen aikataulujen mukaisia yhteyksiä. Aikataulusijoittelun tulokset parantuivat merkittävästi, kun lähtötietoina käytettävät ajoajat tarkennettiin vastaamaan suunniteltuja. Mallin antamat reitit ja matka-ajat saatiin siis tutkituilla yhteysväleillä vastaamaan suunniteltuja.

Tehtyjen tutkimusten perusteella liikennemallien käyttöä voisi kokeilla aikataulusuunnittelun apuvälineenä myös oikeissa suunnittelutilanteissa. Mallin avulla voisi esimerkiksi tutkia eri aikatauluvaihtoehtoja sellaisilla linjoilla, jotka kulkevat monien merkittävien solmupisteiden kautta ja joilla tehdään paljon vaihtoja. Tämä soveltuisi esimerkiksi runkoyhteyksiin ja liityntään perustuvalle liikennejärjestelmälle, sillä mallilla voi tutkia kerralla useampaa vaihtoyhteyttä ja -paikkaa sekä monia eri linjoja.

Menetelmän laajempi käyttö edellyttää kuitenkin aikataulujen ja ajoajojen syöttämisen automatisointia työmäärän vähentämiseksi. Lisäksi mallin laskelmat ovat riippuvaisia monista eri tekijöistä, joiden virheet voivat heijastua myös saataviin tuloksiin. Mallitulojen vastaavuudesta todellisuuden kanssa ei saada varmuutta ilman, että mallin anta-

mia vaihtoehtoja testaisi myös todellisuudessa, mittaisi muutosten vaikutuksia ja vertaisi näitä mallituloksiin.

Tutkimukset toteutettiin HSL:n HELMET-mallilla, joten mallin mahdolliset puutteet vaikuttavat myös tuloksiin. Tutkimukset kohdistuivat pieneen HSL-alueen osaan Itä-Helsingissä, missä suurin osa linjoista on hyvin lyhyitä ja pääosa joukkoliikenneverkosta perustuu liityntäyhteyksiin metrolle. Tutkimusalueen pienen koon vuoksi laajoja verkollisia vaikutuksia ei päästy tarkastelemaan. Liityntälinjalla 84 havaittiin selkeä yhteys metron vuorovälin ja matka-aikasumman minimipisteiden toistumiskohtien välillä. Linjalla 58 matka-aikasumma on tasaisempi, mikä voi johtua siitä, että linjalla ei tarkastelualueella ole yhtä selkeää sidonnaisuutta. Voidaan olettaa, että suuremmassa verkossa yksittäisten muutosten vaikutukset tasoittuvat vielä enemmän. Myös suuremmalla matkamäärällä malli kuitenkin vaikuttaisi käyttäytyvän odotetusti, mikä on lupaavaa mallin mahdollisen laajemman hyödyntämisen kannalta.

Eri muuttujien vaikutuksia tuloksiin tutkittiin diplomityössä vain kahden linjan osalta. Näissä testeissä kysyntämuutoksilla ja sallitun etuajan tai myöhästymisen kasvattamisella ei ollut suurta vaikutusta optimaalisiin aikatauluihin. Näitäkin tekijöitä voisi kuitenkin tutkia tarkemmin tulosten yleistettävyyden varmistamiseksi. Ajoaikojen tarkentaminen sen sijaan selkeästi muutti tuloksia merkittävästi, ja ajoaikoihin onkin syytä kiinnittää huomiota aikataulusijoittelumallin mahdollisen jatkokäytön yhteydessä.

Saatuja tuloksia ei pystytty vertaamaan linjojen kuormitustietojen osalta, sillä HSL:n matkakorttijärjestelmästä ei saa tietoja poistuvista matkustajista. Tämän vuoksi aineistosta ei voi määrittää, mikä osa matkustajista jatkaa tutkimusalueen ulkopuolelle, jolloin aineisto ei ole vertailukelpoista mallilla tutkittujen matkojen kanssa. Matka-aikasummaa laskettaessa matka-aikoja painotetaan matkustajamäärillä, joten myös matkustajamäärien olisi tärkeää vastata todellisuutta matka-aikojen ja reittien ohella. Myös tehdyssä kyselytutkimuksessa eräs vastaaja totesi juuri epätarkkojen kuormitustietojen olevan syy sille, miksi he eivät käytä mallia tämänyyppisissä tarkasteluissa. Tuloksiin tuleekin tältä osin suhtautua kriittisesti ja tutkimusta olisi hyvä voida täydentää aineistolla, jossa vertailua voisi tehdä myös matkustajamäärien osalta.

Kyselytutkimuksessa vastausmäärät joihinkin kysymyksiin jäivät valitettavan alhaisiksi ja osa vastaajista myös vaikutti tulkitsevan kysymyksiä eri tavalla kuin ne oli tarkoitettu. Tähän vaikuttanee käytetty kyselylomake, jota ei testattu ennen kyselyn lähettämistä ja siten saatu kommentteja lomakkeen selkeyttämiseksi. Uuden kysymyksen lisääminen karhukirjeen yhteydessä puolestaan vaikutti kielteisesti kyseisen kohdan vastausprosenttiin. Saaduista vastauksista voidaan todeta, että tutkituissa eurooppalaisissa kaupungeissa ei ole käytössä liikennemalleja aikataulusuunnittelussa, vaan aikataulujen synkronointi tehdään muilla työkaluilla tai käsin.

### **9.3 Jatkotutkimuskohteita**

Tässä diplomityössä vertailtiin ainoastaan matka-aikoja, sillä matkustajamääriä ei ollut mahdollista tutkia käytettävissä olevan aineiston puitteissa. Diplomityön tuloksia olisiikin mahdollista tarkentaa, mikäli vertailu toteutettaisiin sellaisella aineistolla, josta on saatavilla vertailudataa myös matkustajamäärien osalta. Tällainen tutkimusaineisto voisi olla esimerkiksi sama Itä-Helsingin tutkimusalue, jossa matkamatriisiin otettaisiin mukaan myös tutkimusalueelta poistuvat matkat. Tällöin matkakorttijärjestelmästä voisi hakea tutkimusalueella tehtävät nousijamäärät ja vertailla mallin antamia matkustajamääriä näihin. Tällainen jatkotutkimus antaisi paremman kuvan nyt saatujen tulosten luotettavuudesta. Lisäksi tarkennettujen ajoaikojen vaikutuksia tutkittiin tässä työssä

vain kahden linjan osalta, mikä saattaa vääristää tuloksia. Tarkat ajoajat tulisikin olla käytössä koko tutkimusalueella, jotta linjat olisivat keskenään vertailukelpoisia ja tulokset luotettavampia. Mikäli näissä jatkotutkimuksissa saadaan hyviä tuloksia, tutkimus- aluetta voisi edelleen laajentaa, jolloin pääsisi tutkimaan järjestelmätason vaikutuksia.

Olisi mielenkiintoista tutkia myös aikataulusijoittelusta saatavia odotus- ja odotteluajoja ja niiden muutoksia, mikäli käytettävissä olisi aineistoa myös halutuista lähtöajoista. Lisäksi käytettävät sijoitteluparametrit vaikuttavat merkittävästi tuloksiin, ja myös erilaisten parametrien vaikutuksia voisi myöhemmin tutkia tarkemmin.

Jatkotyönä voisi olla mielenkiintoista tutkia myös, saadaanko muilla menetelmillä ja ohjelmilla vastaavia tuloksia kuin tässä työssä havaitut. Visum-ohjelmassa on paljon erilaisia säätömahdollisuuksia, joista osaa ei ole tässä työssä tutkitussa Emmessä. Ohjelma onkin Tampereella havaittu toimivaksi ja helppokäyttöiseksi, ja sitä on käytetty myös mm. Tukholmassa, josta voisi saada hyödyllisiä käyttökokemuksia. Hastus-ohjelmaan kuuluva NetPlan-työkalu voisi myös soveltua aikataulujen ideointiin ja se on tulossa käyttöön yhdessä diplomityön yhteydessä tehtyyn kyselyyn vastanneessa kaupungissa. NetPlan ei kuitenkaan tällä hetkellä osaa huomioida matkustajamääriä kovin kattavasti, vaan vaihtoyhteyksien painottaminen tapahtuu käsityönä. Lisäksi olisi mielenkiintoista tutkia, antaako Helsingin yliopiston Reitin-työkalu vastaavia tuloksia kuin perinteisemmät kaupalliset ohjelmistot.

Aikataulusuunnittelun matemaattiset mallit osaavat tällä hetkellä ratkaista yksinkertaistettuja ongelmia, joista on saatu lupaavia tuloksia. Voisikin testata, saisiko malleista apua joihinkin käytännön aikataulusuunnitteluongelmiin. Tutkimusalan kehitystä on myös syytä seurata, sillä on syytä olettaa mallien kehittyvän edelleen uuden tutkimuksen myötä.

## Lähteet

- Anttila, T. 2013. Osastonjohtaja. Helsingin seudun liikenne. Helsinki, PL 102, 00077 HSL. Haastattelu 19.4.2013.
- Black, A. 1995. Urban Mass Transportation Planning. Singapore. McGraw-Hill. ISBN 0-07-113950-8.
- Caliper. 2009. Travel Demand Modeling with TransCAD. Newton, MA. Viitattu 10.6.2013. Saatavilla: <http://www.caliper.com/PDFs/TravelDemandModelingBrochure.pdf>
- Ceder, A. 2009. Public-Transport Automated Timetables using Even Headway and Even Passenger Load Concepts. ATRF 2009 32nd Australasian Transport Research Forum 29.9.-1.10.2009. S. 1-17.
- Ceder A., Golany B. & Tal O. 2001. Creating bus timetables with maximal synchronization. Transportation Research Part A. Vol. 35:10. S. 913-928. DOI: 10.1016/S0965-8564(00)00032-X.
- Ceder, A. & Wilson, N. H. M. 1986. Bus Network Design. Transportation Research Part B. Vol. 20B:4. S. 331-344. ISSN 0191-2615.
- Citilabs. 2013. Cube Voyager Modeling Functions. Viitattu 10.6.2013. Saatavilla: <http://www.citilabs.com/products/cube/cube-voyager/cube-voyager-modeling-functions>
- Currie, G. & Bromley, L. 2005. Developing measures of public transport schedule coordination quality. 28th Australasian Transport Research Forum. Viitattu 11.7.2014. Saatavilla: [http://www.atrf.info/papers/2005/2005\\_Currie\\_Bromley.pdf](http://www.atrf.info/papers/2005/2005_Currie_Bromley.pdf)
- Desaulniers, G. & Hickman, M. 2007. Chapter 2. Public Transit. Teoksessa: Handbooks in Operations Research and Management Science. Vol. 14. S. 69-127. DOI: 10.1016/S0927-0507(06)14002-5.
- Duarte, E & Lage, B. 2008. Travel time analysis for timetable improvements. Lainattu Lukkarinen 2012.
- Dériaz, B. 1999. Deterministic transit assignment: First tests and first questions. 14th annual Emme/2 International Users' Group Conference. Chicago Illinois. 20-22.10.1999. Saatavilla: [http://www.inrosoftware.com/en/pres\\_pap/international/ieug99/p-chi-1.pdf](http://www.inrosoftware.com/en/pres_pap/international/ieug99/p-chi-1.pdf)
- Elfström M., Frösén N., Kantokari P., Koskela R., Manninen A., Nissinen P., Rätty L., Saarinen J., Siitonen A., Sundell L., Vuorinen H. 2013. Joukkoliikennesuunnittelija. Helsingin seudun liikenne. Helsinki, PL 102, 00077 HSL. Haastattelut 4.7.-16.9.2013.
- Elolähde T., Rätty P., Vihervuori M. & Kangas H. 2011. Helsingin seudun työssäkäyntialueen liikenne-ennustemallit 2010. Helsinki. HSL Helsingin seudun liikenne. HSL:n julkaisuja 33/2011. ISBN 978-952-253-124-7.
- Elolähde, T. 2013. Suunnittelija. Helsingin seudun liikenne. Helsinki, PL 102, 00077 HSL. Haastattelu 9.10.2013.
- Florian M., Mahut M. & Tremblay N. 2001. A Hybrid Optimization-Mesosopic Simulation Dynamic Traffic Assignment Model. Intelligent Transportation Systems Proceedings. IEEE. 2001. S. 118-121. ISBN 0-7803-7194-1.

- Guihaire, V. & Hao, J. 2008. Transit network design and scheduling: A global review. *Transportation Research Part A*. Vol. 42:10. S. 1251-1273. DOI: 10.1016/j.tra.2008.03.011.
- Haapamäki, T. 2010. Liikennejärjestelmän Emme-kuvauksen kehittäminen joukkoliikennesuunnittelun tueksi. Diplomityö. Aalto-yliopiston teknillinen korkeakoulu, Insinööritieteiden ja arkkitehtuurin tiedekunta. Espoo. 97 s.
- Helke, L. & Kantola, T. 2009. Vakiominuuttiaikataulumallin soveltaminen HKL:n bussi- ja raitiotielinjastolla. Helsinki. HKL:n julkaisusarja D: 18/2009.
- HiTrans. 2005. HiTrans Best practice guide 2: Public transport – Planning the networks. ISBN 82-990111-3-2.
- HiTrans. 2005. HiTrans Best practice guide 5: Public transport – Citizens' requirements. ISBN 82-990111-6-7.
- Honkonen, J. 2013. Projektipäällikkö. Helsingin seudun liikenne. Helsinki, PL 102, 00077 HSL. Haastattelu 24.10.2013.
- HSL Helsingin seudun liikenne. 2010. Helsingin seudun työssäkäyntialueen laajan liikennetutkimuksen (LITU 2008) yhteenveto. Helsinki. HSL:n julkaisuja 33/2010.
- HSL Helsingin seudun liikenne. 2010. Joukkoliikennestrategia. Helsinki. HSL:n julkaisuja 22/2010. ISBN 978-952-253-043-1.
- HSL Helsingin seudun liikenne. 2010. Liikkumistottumukset Helsingin seudun työssäkäyntialueella vuonna 2008. Helsinki. HSL:n julkaisuja 32/2010. ISBN 978-952-253-058-5.
- HSL Helsingin seudun liikenne. 2012. LIJ-sanasto. 20.6.2012. Helsinki.
- HSL Helsingin seudun liikenne. 2013. HLJ 2015 Liikkumistottumukset Helsingin seudulla 2012. Helsinki. HSL:n julkaisuja 27/2013. ISBN 978-952-253-214-5.
- HSL Helsingin seudun liikenne. 2013. Matka-aikakartta: Ohjeet. Viitattu 30.10.2013. Saatavilla: <http://mak.hsl.fi/ohje.html>
- HSL Helsingin seudun liikenne. 2013. SAVU-karttojen tuottamismenetelmän päivitys ja joukkoliikenteen matka-aikasaavutettavuusanalyysi (MASA): Muistioloannos 27.9.2013. Helsinki.
- Ibarra-Rojas, O. & Rios-Solis, Y. 2012. Synchronization of bus timetabling. *Transportation Research Part B*. Vol 46:5. S. 599-614. DOI: 10.1016/j.trb.2012.01.006.
- INRO. 2013. Emme Prompt Manual, Version 4.0. Montréal, Canada.
- INRO. 2014. Sähköpostiviesti 23.1.2014.
- Kalenoja, H. 2012. Tutkimuspäällikkö. Tampereen teknillinen yliopisto, Liikenteen tutkimuskeskus Verne. PL 541, 33101 Tampere. Haastattelu 18.12.2012.
- Kalenoja, H. & Pajarre M. 2014. Tutkimuspäällikkö & tutkimusapulainen. Tampereen teknillinen yliopisto, Liikenteen tutkimuskeskus Verne. PL 541, 33101 Tampere. Haastattelu 18.6.2014.
- Kangas, H. 2013. IT-asiantuntija. Helsingin seudun liikenne. Helsinki, PL 102, 00077 HSL. Haastattelu 17.10.2013.
- Knoppers, P. & Muller, T. 1995. Optimized Transfer Opportunities in Public Transport. *Transportation Science*. Vol. 29:1. S. 101-105. ISSN 00411655.

- Käräjämies, U. 2000. Simulointi käyttäjän näkökulmasta. Teoksessa: Pursula, M. et al. (toim.) Liikennetekniikan seminaari 1999-2000, Liikenteen simulointi. Espoo. Otamedia. S. 7-30. ISBN 951-22-4955-3.
- Liikennevirasto. 2010. Tieliikenteen ajokustannusten yksikköarvot 2010. Liikenneviraston ohjeita 21/2010. Helsinki. ISBN 978-952-255-041-5.
- Liikennevirasto. 2011. Liikenneväylien hankearviointin yleisohje. Liikenneviraston ohjeita 14/2011. Helsinki. ISBN 978-952-255-693-6.
- Lukkarinen, S. 2012. Optimaalisen ajoajan määrittely aikataulusuunnittelussa. Diplomityö. Aalto-yliopisto, Yhdyskunta- ja ympäristötekniikan laitos. Espoo. 80 s.
- Lyly, S. 1978. Yhdyskuntien joukkoliikenne. Otaniemi. Helsingin teknillinen korkeakoulu, Liikennetekniikka, Julkaisu 42. ISBN 951-751-188-4.
- Matrex Oy. 2002. Joukkoliikenteen laatumittari: Loppuraportti. 15.4.2002. Saatu sähköpostilla 18.10.2012.
- Nuzzolo, A. & Crisalli, U. 2009. The schedule-based modelling of transportation systems: Recent developments. Teoksessa: Wilson, N.M.H. & Nuzzolo, A. (toim.) Schedule-Based Modeling of Transportation Networks: theory and applications. Springer. S. 1-26. ISSN 1387-666X.
- Ojala, J. & Pursula, M. 1994. Taajamien joukkoliikenteen suunnittelu ja hoito. Otaniemi. Suomen paikallisliikenneliitto ry. Teknillinen korkeakoulu, Liikennetekniikka, Opetusmoniste 13.
- OmniTRANS. 2013. OmniTRANS Features. Viitattu 23.10.2013. Saatavilla: <http://www.omnitrans-international.com/en/products/omnitrans/product-overview/features>
- Ortúzar, J. & Willumsen, L. 1994. Modelling Transport, Second Edition. Chichester, West Sussex. John Wiley & Sons Ltd. ISBN 0-471-94193-X.
- Partanen, P. 2000. Aikaan sidottu joukkoliikennesijoittelu. Diplomityö. Teknillinen korkeakoulu, Rakennus- ja ympäristötekniikan osasto. Espoo. 123 s.
- Poorjafari V., Yue W. L. & Holyoak N. 2014. A New Mathematical Programming Model for Transit Timetable Synchronisation. 32nd Conference of Australian Institutes of Transport Research. 17-18.2.2014. Viitattu 30.5.2014. Saatavilla: [http://www.rciti.unsw.edu.au/sites/default/files/2-4\\_vahid\\_poorjafari\\_-\\_mathematical\\_modelling\\_for\\_tssp.pdf](http://www.rciti.unsw.edu.au/sites/default/files/2-4_vahid_poorjafari_-_mathematical_modelling_for_tssp.pdf).
- PTV. 2012. PTV Visum 12.5, Fundamentals. Karlsruhe, Germany.
- PTV. 2013. How can you create perfect services all along the line? PTV Visum PuT Brochure. Viitattu 10.6.2013. Saatavilla: [http://vision-traffic.ptvgroup.com/fileadmin/files\\_ptvvision/Downloads\\_N/0\\_General/2\\_Products/1\\_PTV\\_Visum/EN\\_PTV\\_Visum\\_PuT\\_Brochure.pdf](http://vision-traffic.ptvgroup.com/fileadmin/files_ptvvision/Downloads_N/0_General/2_Products/1_PTV_Visum/EN_PTV_Visum_PuT_Brochure.pdf)
- Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry. 2005. Liikenne ja väylät I. Helsinki. RIL 165-1. ISBN 951-758-459-8.
- Räty L., Kallionpää L., Airaksinen S., Wallin J. & Anttila T. 2012. Joukkoliikenteen suunnitteluohje HSL-liikenteessä. Helsinki. HSL Helsingin seudun liikenne. HSL:n julkaisu 4/2012. ISBN 978-952-253-137-7.



Räty, L. 2013. Joukkoliikennesuunnittelija. Helsingin seudun liikenne. Helsinki, PL 102, 00077 HSL. Haastattelu 4.7.2013.

Saarsalmi P., Salonen M., Järvi J. & Toivonen T. 2014. MetropAccess-Reititin 2.0 - BETA – Käyttöohje. Viitattu 26.5.2014. Saatavilla: [http://www.helsinki.fi/science/accessibility/tools/MetropAccess-Reititin/MetropAccess-Reititin\\_Kayttoohje\\_BETA.pdf](http://www.helsinki.fi/science/accessibility/tools/MetropAccess-Reititin/MetropAccess-Reititin_Kayttoohje_BETA.pdf)

Sagdahl, O-J. 2014. Pohjoismaiden edustaja. GIRO. Sähköpostiviesti. 28.7.2014.

Särkkä, T. 2013. Johtava konsultti. SITO. Tuulikuja 2, 02100 Espoo. Haastattelu 21.8.2013.

Terzis, G. & Last, A. 2000. Urban Interchanges - A Good Practice Guide. Woking. MVA limited. Viitattu 4.10.2013. Saatavilla: <http://www.transport-research.info/Upload/Documents/200310/guide.pdf>

Trafix Oy. 2013. HSL liikenneverkkojen ATK-kuvausten päivittäminen 2012. 28.3.2013.

Vanhanen K., Toiskallio K., Aalto P., Lehto H., Lehmuskoski V. & Sihvola T. 2007. Joukkoliikenteen kokonaislaatuun vaikuttavat tekijät, painopisteenä paikallisliikenne. Osaraportti 3. Liikenne- ja viestintäministeriön julkaisuja 66C/2007. ISBN 978-952-201-975-2.

Vatanen, M. 2013. Liikennesuunnittelija. Helsingin seudun liikenne. Helsinki, PL 102, 00077 HSL. Haastattelu 11.10.2013.

Vuchic, V. 2005. Urban Transit: Operations, planning and economics. Hoboken, New Jersey. John Wiley & Sons, Inc. ISBN 0-471-63265-1.

Wallin, J. 2013. Projektipäällikkö / Suunnittelija. WSP. Heikkiläntie 7, 00210 Helsinki. Haastattelu 27.8.2013.

## **Liiteluettelo**

Liite 1. Joukkoliikennematkojen kysynnän jakautuminen aamuhuipputunnin aikana. 1 sivu.

Liite 2. Kyselylomake. 1 sivu.

Liite 3. Kaupunkikohtaiset kyselytulokset. 3 sivua.

Liite 4. Matka-aikavertailun tulokset välillä Laajasalo-keskusta. 5 sivua.

Liite 5. Yksittäisten reittien matka-aikavertailun tulokset. 1 sivu.

Lähtöaika	Joukkoliikenne- matkojen määrä (pääasiallinen kulkutapa)	Minuutin kysyntäosuus (60min jako)	Minuutin kysyntäosuus (1min jako)	Minuutin kysyntäosuus (5min jako)	5 min kysyntä- osuus
715	5235,5	0,016666667	0,048504877	0,012540764	6,3 %
716	240	0,016666667	0,002223507	0,012540764	
717	875,3	0,016666667	0,008109315	0,012540764	
718	417,3	0,016666667	0,003866123	0,012540764	
719	0	0,016666667	0	0,012540764	
720	6023,2	0,016666667	0,055802612	0,011160522	5,6 %
721	0	0,016666667	0	0,011160522	
722	0	0,016666667	0	0,011160522	
723	0	0,016666667	0	0,011160522	
724	0	0,016666667	0	0,011160522	
725	3557,7	0,016666667	0,032960711	0,010234432	5,1 %
726	1531,2	0,016666667	0,014185974	0,010234432	
727	434,5	0,016666667	0,004025474	0,010234432	
728	0	0,016666667	0	0,010234432	
729	0	0,016666667	0	0,010234432	
730	26682,8	0,016666667	0,247205793	0,050296097	25,1 %
731	0	0,016666667	0	0,050296097	
732	0	0,016666667	0	0,050296097	
733	461,4	0,016666667	0,004274692	0,050296097	
734	0	0,016666667	0	0,050296097	
735	1648,3	0,016666667	0,01527086	0,005568958	2,8 %
736	19,3	0,016666667	0,000178807	0,005568958	
737	0	0,016666667	0	0,005568958	
738	1062,9	0,016666667	0,009847356	0,005568958	
739	275	0,016666667	0,002547768	0,005568958	
740	7125,8	0,016666667	0,066017773	0,014263797	7,1 %
741	0	0,016666667	0	0,014263797	
742	0	0,016666667	0	0,014263797	
743	0	0,016666667	0	0,014263797	
744	572,2	0,016666667	0,005301211	0,014263797	
745	6701,7	0,016666667	0,062088651	0,014296038	7,1 %
746	277,9	0,016666667	0,002574636	0,014296038	
747	0	0,016666667	0	0,014296038	
748	735,8	0,016666667	0,006816902	0,014296038	
749	0	0,016666667	0	0,014296038	
750	4754,9	0,016666667	0,044052304	0,00974211	4,9 %
751	0	0,016666667	0	0,00974211	
752	502,8	0,016666667	0,004658247	0,00974211	
753	0	0,016666667	0	0,00974211	
754	0	0,016666667	0	0,00974211	
755	2397,8	0,016666667	0,022214687	0,005866352	2,9 %
756	0	0,016666667	0	0,005866352	
757	0	0,016666667	0	0,005866352	
758	768,2	0,016666667	0,007117075	0,005866352	
759	0	0,016666667	0	0,005866352	
800	26212	0,016666667	0,242844014	0,050047064	25,0 %
801	0	0,016666667	0	0,050047064	
802	797,8	0,016666667	0,007391308	0,050047064	
803	0	0,016666667	0	0,050047064	
804	0	0,016666667	0	0,050047064	
805	4079,2	0,016666667	0,037792206	0,009748966	4,9 %
806	0	0,016666667	0	0,009748966	
807	1182,2	0,016666667	0,010952624	0,009748966	
808	0	0,016666667	0	0,009748966	
809	0	0,016666667	0	0,009748966	
810	3364,8	0,016666667	0,031173567	0,006234713	3,1 %
811	0	0,016666667	0	0,006234713	
812	0	0,016666667	0	0,006234713	
813	0	0,016666667	0	0,006234713	
814	0	0,016666667	0	0,006234713	
yhteensä	107937,6	1	1	1	100,0 %

# 

matkan aloitusajan jakauma ruuhkatunnin aikana minuutin tarkkuudella

vain Helsingin seudun 14 kunnan asukkaat, vain tunnetut kulkutavat ja matkaryhmit

laajennettu, mutta ei tasokorjattu



## Questionnaire

28.10.2013

**Questionnaire about transit scheduling**

1. How is planning work distributed between the transportation authority and the operator(s)? Who is in charge of designing the route network and transit timetables? How is the quality of plans made by the operator(s) managed and assured?
2. How are different timetables planned and matched to each other? How is the totality optimized? What is prioritized? What tools are used to evaluate the quality of timetables? (see example cases below)
3. Have traffic models been used to aid in transit scheduling? What kinds of models are used?
4. Are traffic models used in other planning activities (e.g. transportation system planning)? Has timetable-based (deterministic) transit assignment been used? Which software is used for standard/deterministic assignment (e.g. Emme, Visum, Transcad)?

## Example cases:

- Where should transfers be optimized on a line with multiple transfer points and with multiple transferring lines?
- Where is the best place to synchronize multiple lines if they have several joint segments?
- How to decide between even headways and e.g. connections to trains or school hours with varying schedules?
- How to plan transit supply during a peak moment? Is it better to divide the peak demand between several vehicles, so that wait time for some passengers is greater, or to schedule the vehicle so that all passengers make the connection, but it is very crowded?
- What are the benefits of clock face timetables? How can they be quantified?

	Amsterdam (NL)	Barcelona (ES)	Berliini (DE)	Birmingham (Centro Area) (UK)	Budapest (HU)	Frankfurt (DE)
<b>Palvelutason määrittely</b>	Viranomainen	Viranomainen	Viranomainen	Liikennöitsijä, joitakin ostovuoroja	Viranomainen	Viranomainen
<b>Bussilinjaston suunnitteluvastuu</b>	Liikennöitsijä	Liikennöitsijä	Viranomainen	Liikennöitsijä	Viranomainen	Viranomainen
<b>Bussiaikataulujen suunnitteluvastuu</b>	Liikennöitsijä	Liikennöitsijä	Liikennöitsijä	Liikennöitsijä	Viranomainen	Viranomainen
<b>Laadunvalvonta</b>	Viranomainen	Viranomainen	-	Viranomainen (sanktioita)	Viranomainen (laatukannusteita)	Viranomainen
<b>Aikataulukokonaisuuden suunnitteluperiaate</b>	Junien priorisointi	Junien priorisointi	Tiheä liikenne, ei tarvetta aikataulujen yhteensovittamiselle	Tiheä liikenne, ei tarvetta aikataulujen yhteensovittamiselle	Suuren kysynnän suuntien priorisointi	Junien priorisointi
<b>Aikataulukokonaisuuden suunnitteluperiaate 2</b>		Tiheä liikenne, ei tarvetta aikataulujen yhteensovittamiselle	Päävaihtopaikan mukaan			Seutulikennettä priorisoidaan paikallisliikenteen yli
<b>Aikataulujen arviointiyökalut</b>	-	-	-	-	Ei	Kyllä
<b>Käytetty ohjelma</b>						Viriato (aikataulusuunnittelu)
<b>Liikennemallien käyttö aikataulusuunnittelussa</b>	Ei	Ei	Ei	Ei	Visum-järjestelmä hankinnassa 2014	Ei
<b>Seudulla käytettävä liikennemalli</b>	-	-	Visum	-	-	-

	Kööpenhamina (DK)	Lontoo (UK)	Oslo (NO)	Praha (CZ)	Rotterdam (NL)	Stuttgart (DE)
<b>Palvelutason määrittely</b>	Viranomainen	Viranomainen	Viranomainen	Viranomainen	Viranomainen	Viranomainen
<b>Bussilinjaston suunnitteluvastuu</b>	Viranomainen	Viranomainen	Viranomainen	Viranomainen	Liikennöitsijä	Viranomainen
<b>Bussiaikataulujen suunnitteluvastuu</b>	Viranomainen	Liikennöitsijä	Viranomainen	Viranomainen, poikkeuksena yksi liikennöitsijä	Liikennöitsijä	Viranomainen
<b>Laadunvalvonta</b>	-	Viranomainen	-	-	-	-
<b>Aikataulukokonaisuuden suunnitteluperiaate</b>	Priorisoitujen ja suurimpien matkustajavirtojen priorisointi	Tiheä liikenne, ei tarvetta aikataulujen yhteensovittamiselle	-	Suurimman kysynnän tai pisimmän vuorovälin priorisointi	Tiheä liikenne, pääosin ei tarvetta aikataulujen yhteensovittamiselle	Tiheä liikenne, ei tarvetta aikataulujen yhteensovittamiselle
<b>Aikataulukokonaisuuden suunnitteluperiaate 2</b>	Optimaalinen matkustusaika, yhteyksien lukumäärä, bussien lukumäärä				Suuren kysynnän suuntien priorisointi	
<b>Aikataulujen arviointityökalut</b>	Käsityönä	-	Käsityönä, työkalu hankinnassa 2014	-	-	-
<b>Käytetty ohjelma</b>	Hastus (aikataulusuunnittelu)		Hastus NetPlan		Hastus (aikataulusuunnittelu)	
<b>Liikennemallien käyttö aikataulusuunnittelussa</b>	Ei	Ei	Ei	Ei	Ei	-
<b>Seudulla käytettävä liikennemalli</b>	-	-	Emme	-	-	Visum

	Tampere	Tukholma (SE)	Varsova (PO)	Wien (AT)	Vilna (LT)
<b>Palvelutason määrittely</b>	Viranomainen	Viranomainen	Viranomainen	-	Viranomainen
<b>Bussilinjaston suunnitteluvastuu</b>	Viranomainen	Liikennöitsijä	Viranomainen	-	Viranomainen
<b>Bussiaikataulujen suunnitteluvastuu</b>	Viranomainen	Liikennöitsijä	Viranomainen	Liikennöitsijä (kunnallinen)	Viranomainen
<b>Laadunvalvonta</b>	Viranomainen (sanktioita)	Viranomainen	-	-	-
<b>Aikataulukokonaisuuden suunnitteluperiaate</b>	Tasamuuuuttisuus, täsmällisyys	Runkoverkon priorisointi	Tiheä liikenne, pääosin ei tarvetta aikataulujen yhteensovittamiselle	Tiheä liikenne, ei tarvetta aikataulujen yhteensovittamiselle	Lähiöiden priorisointi
<b>Aikataulukokonaisuuden suunnitteluperiaate 2</b>	Porrastus hiljaiseen aikaan		Suuren kysynnän suuntien priorisointi		
<b>Aikataulujen arviointityökalut</b>	-	Ei	Kyllä	-	-
<b>Käytetty ohjelma</b>	Winbus (linjasto- ja aikataulu-suunnittelu)		AGC Busman	Diva	PikasGPS (toteuman arviointi)
<b>Liikennemallien käyttö aikataulusuunnittelussa</b>	Ei	-	Ei	-	Ei
<b>Seudulla käytettävä liikennemalli</b>	Emme ja Visum käytössä yliopistolla	-	Visum	Visum	Harkinnassa Visumin hankinta, Emme ja Visum käytössä yliopistolla

## Reittioppaan parametrit ja tulokset välillä Laajasalo-keskusta



**Reittiopas**  
Helsingin seudun liikenne

Mobiili | Pääsv

Reittihaku

Aikataulut ja pysäkit • Linjakartta • Pyöräily ja kävely

## Reittihaku

Tavallinen reittihaku

Mistä Kasperinkuja 14, Helsinki

Kartta | A-O

Välietappi

Kartta | A-O

Välietapissa 0 minuuttia

Mihin Keskuskatu 5, Helsinki

Kartta | A-O

Kello 07 :00

Pvm Tänään

☒ Lähtöaika

☐ Huomenna

☐ Perillä

☐ 5.3.

Vaihtomarginaali 1 minuuttia

Kävelynopeus Oletus 70 m/min

Reittityyppi Nopein

Lippuvyöhykkeet Ei lippuvyöhykerajoitusta

Liikennevälineet

☒

Bussi

☒

Metro

☒

Raitiovaunu

☒

Juna

☒

U-linjat

☒

Palvelulinjat

☐ Pelkkä kävely

Reittiehdotuksia 5 kpl

☐ Näytä esteettömyystiedot

☐ Tallenna nämä asetukset

Hae reitti



## Reittiehdotus

Nopein

Kulkuvälineet ☒ ☒ ☒ ☒ ☒ ☒ ☒ ☒

Näytä 3

Matkaan	Perillä	Matka-aika	Kävelyä
<p>1</p> <p>07:01 07:09 07:18 07:22 07:32 07:36</p> <p>0.6 km Sarpapolku 0.1 km Herttoniemi 0.3 km</p>		35 min	1 km
<p>2</p> <p>07:08 07:11 07:25 07:30 07:40 07:44</p> <p>0.3 km Gunillaanpolku 0.1 km Herttoniemi 0.3 km</p>		36 min	0,7 km
<p>3</p> <p>07:13 07:21 07:30 07:34 07:44 07:48</p> <p>0.6 km Sarpapolku 0.1 km Herttoniemi 0.3 km</p>		35 min	1 km
<p>4</p> <p>07:16 07:19 07:34 07:38 07:48 07:52</p> <p>0.3 km Gunillaanpolku 0.1 km Herttoniemi 0.3 km</p>		36 min	0,7 km
<p>5</p> <p>07:24 07:27 07:42 07:46 07:56 08:00</p> <p>0.3 km Gunillaanpolku 0.1 km Herttoniemi 0.3 km</p>		36 min	0,7 km

← Edelliset Nyt Seuraavat →

Tulokset perustuvat arvioituihin ajoaikoihin.  
Ehdotetun yhteyden toteutumista ei voida taata.

Säätietoja ei saatavilla



## Reitin tiedot

Reitin CO<sub>2</sub>-päästöt

0,4 kg

Oho

1,2 kg



Tulosta



Läheta

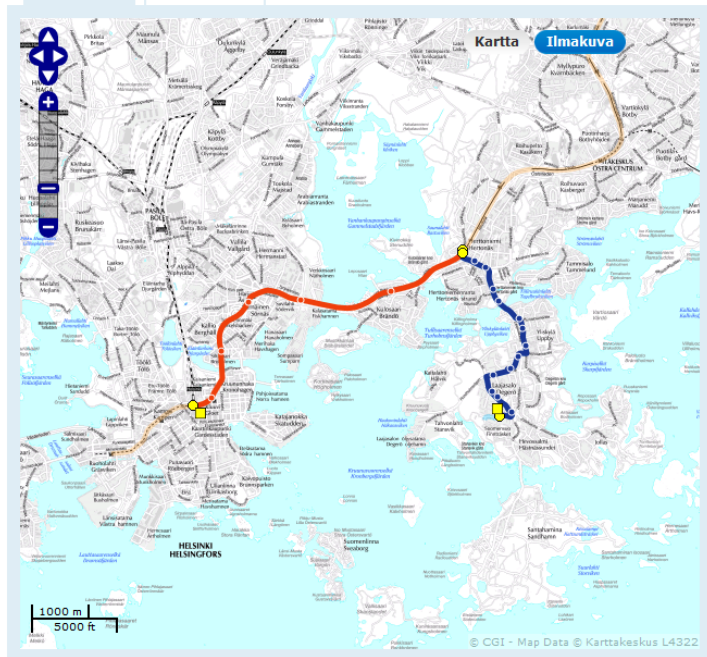
Lahti	
07:16	Kasperinkuja 14, Helsinki
	⊕ Kävely 0,3 km
07:19	Gunillanpolku (4162)
	⊖ Bussi 84 5 km → Herttoniemi(M)
07:19	Gunillanpolku (4162)
07:20	Svanströmintie (4102)
07:21	Kasperinkuja (4100)
07:22	Rudolfintie (4098)
07:24	Lauri Mikonpojan tie (4096)
07:25	Isosaarentie (4094)
07:26	Jussaarenkuja (4092)
07:27	Yliskyläntie (4090)
07:28	Humalaniementie (4088)
07:29	Itäniitynpolku (4086)
07:30	Tuorinniemi (4084)
07:31	Kaivolahdenkatu (4082)
07:32	Linnanrakentajantie (4080)
07:33	Laivalahdenportti (4036)
07:34	Herttoniemi(M) (4048)
07:34	Herttoniemi(M) (4048)
	⊕ Kävely 0,1 km
07:38	Herttoniemi (0020)
	⊖ Metro 6,8 km → Ruoholahti
07:38	Herttoniemi (0020)
07:40	Kulosaari (0019)
07:42	Kalasatama (0018)
07:44	Sörnäinen (0017)
07:45	Hakaniemi (0016)
07:47	Kaisaniemi (0015)
07:48	Rautatienatori (0014)
07:48	Rautatienatori (0014)
	⊕ Kävely 0,3 km
07:52	Keskuskatu 5, Helsinki

Perillä Reitin kokonaispituus ~ 12,5 km

» Jatka reittiä määränpäästä

Reittikartta

Vaihtokartat



**Emme-mallin parametrit ja tulokset välillä Laajasalo-keskusta**

Emme Module: 5.36 Date: 14-03-04 14:40 User: E065/HSL/HRT..none Page:\*\*\*\*\*

Database Title: testisijoittelu

Scenario 65: Daht13 Itä-Hki yksittäismatkojen Reittiopasvertailu

Input file: batchin\_aikataulusijoittelun\_lahtoaajat\_valilyonti.txt (record 1)

**DETERMINISTIC TRANSIT ASSIGNMENT**

\*\*\*\*\*

Line offsets: ut1

Number of runs: ut2

Minimum waiting time: 1.00 min

Boarding penalty: ut3

Aux. transit time weight: 1.50 Boarding penalty weight: 1.00

In-vehicle time weight: 1.00

Beginning of period: 00h00 Maximum trip time: 9999.00 min

Def. early/late granularity: 1.00 min Maximum trip cost: 9999.00 min

Default max. earliness: 0.00 min Default max. lateness: 0.00 min

Default earliness penalty: 0.00/min Default lateness penalty: 0.00/min

Aux.tr. mode a(Kävely ): 38203 links 38121 active links

Transit mode b(HSL-bussi ): 1257 lines 113311 transit segments 11377745 segment departures

Transit mode B(Muu bussi ): 0 lines 0 transit segments 0 segment departures

Transit mode m(Metro ): 4 lines 52 transit segments 1170 segment departures

Transit mode r(HSL-juna ): 38 lines 642 transit segments 2790 segment departures

Transit mode R(Muu Juna ): 10 lines 183 transit segments 283 segment departures

Transit mode t(Ratikka ): 105 lines 4342 transit segments 16570 segment departures

Aux.tr. mode A(Ulkokävely): 82 links 82 active links

Transit mode P(Pikaratikk): 0 lines 0 transit segments 0 segment departures

from 1195 to 1090 desired departure:01h00

trips: 1

at node	arr time	dep time	with line/mode	--time(late .15)--				--cost(late .15)--				-distance-	
				aux	wait	inv	cumul	aux	wait	inv	cumul	(km)	cumul
1195		01h00	a	4.29			4.29	6.43			6.58	.30	.30
201458	01h04	01h04	a	.86			5.14	1.29			7.86	.06	.36
201460	01h05	01h05	a	1.00			6.14	1.50			9.36	.07	.43
205155	01h06	01h06	a	.14			6.29	.21			9.58	.01	.44
205154	01h06	01h06	a	.43			6.71	.64			10.22	.03	.47
212158	01h07	01h08	10864 b		1.00	8.49	16.20		5.83	8.49	24.54	3.70	4.17
221744	01h16	01h16	a	2.29			18.49	3.43			27.97	.16	4.33
250540	01h19	01h22	1300M2 m		3.41	10.05	31.95		4.41	10.05	42.43	6.96	11.29
250534	01h32	01h32	a	2.14			34.09	3.21			45.64	.15	11.44
243008	01h34	01h34	a	1.29			35.38	1.93			47.57	.09	11.53
243045	01h36	01h36	a	1.14			36.52	1.71			49.29	.08	11.61
1090	01h37		total:	13.57	4.41	18.54	36.52	20.36	10.24	18.54	49.29		11.61

summary by mode:	b	1		1.15	8.49			5.98	8.49			3.70
	m	1			3.41	10.05			4.41	10.05		6.96
	a			13.57				20.36				.95

from 1195 to 1090 desired departure:01h01

trips: 1

at node	arr time	dep time	with line/mode	--time(late 6.54)--				--cost(late 6.54)--				-distance-	
				aux	wait	inv	cumul	aux	wait	inv	cumul	(km)	cumul
1195		01h08	a	2.00			2.00	3.00			9.54	.14	.14
201472	01h10	01h10	a	.14			2.14	.21			9.76	.01	.15
201473	01h10	01h11	10846 b		1.00	11.02	14.16		5.34	11.02	26.11	4.68	4.83
221744	01h22	01h22	a	2.29			16.45	3.43			29.54	.16	4.99
250540	01h24	01h26	1300v2 m		2.06	10.05	28.56		3.06	10.05	42.65	6.96	11.95
250534	01h36	01h36	a	2.14			30.70	3.21			45.87	.15	12.10
243008	01h38	01h38	a	1.29			31.99	1.93			47.79	.09	12.19
243045	01h40	01h40	a	1.14			33.13	1.71			49.51	.08	12.27
1090	01h41		total:	9.00	3.06	21.07	33.13	13.50	8.40	21.07	49.51		12.27

summary by mode:	b	1		7.54	11.02			11.88	11.02			4.68
	m	1			2.06	10.05			3.06	10.05		6.96
	a			9.00				13.50				.63

from 1195 to 1090 desired departure:01h10

trips: 1

at	arr	dep	with	--time(late 5.54)--				--cost(late 5.54)--				-distance-	
node	time	time	line/mode	aux	wait	inv	cumul	aux	wait	inv	cumul	(km)	cumul
1195		01h16	a	2.00			2.00	3.00			8.54	.14	.14
201472	01h18	01h18	a	.14			2.14	.21			8.76	.01	.15
201473	01h18	01h19	10848 b		1.00	11.02	14.16		5.34	11.02	25.11	4.68	4.83
221744	01h30	01h30	a	2.29			16.45	3.43			28.54	.16	4.99
250540	01h32	01h34	1300v2 m		2.06	10.05	28.56		3.06	10.05	41.65	6.96	11.95
250534	01h44	01h44	a	2.14			30.70	3.21			44.87	.15	12.10
243008	01h46	01h46	a	1.29			31.99	1.93			46.79	.09	12.19
243045	01h48	01h48	a	1.14			33.13	1.71			48.51	.08	12.27
1090	01h49		total:	9.00	3.06	21.07	33.13	13.50	8.40	21.07	48.51		12.27

summary by mode:	b	1		6.54	11.02			10.88	11.02			4.68	
	m	1		2.06	10.05			3.06	10.05			6.96	
	a			9.00				13.50				.63	

from 1195 to 1090 desired departure:01h18

trips: 1

at	arr	dep	with	--time(late 5.54)--				--cost(late 5.54)--				-distance-	
node	time	time	line/mode	aux	wait	inv	cumul	aux	wait	inv	cumul	(km)	cumul
1195		01h24	a	2.00			2.00	3.00			8.54	.14	.14
201472	01h26	01h26	a	.14			2.14	.21			8.76	.01	.15
201473	01h26	01h27	10848 b		1.00	11.02	14.16		5.34	11.02	25.11	4.68	4.83
221744	01h38	01h38	a	2.29			16.45	3.43			28.54	.16	4.99
250540	01h40	01h42	1300v2 m		2.06	10.05	28.56		3.06	10.05	41.65	6.96	11.95
250534	01h52	01h52	a	2.14			30.70	3.21			44.87	.15	12.10
243008	01h54	01h54	a	1.29			31.99	1.93			46.79	.09	12.19
243045	01h56	01h56	a	1.14			33.13	1.71			48.51	.08	12.27
1090	01h57		total:	9.00	3.06	21.07	33.13	13.50	8.40	21.07	48.51		12.27

summary by mode:	b	1		6.54	11.02			10.88	11.02			4.68	
	m	1		2.06	10.05			3.06	10.05			6.96	
	a			9.00				13.50				.63	

from 1195 to 1090 desired departure:01h26

trips: 1

at	arr	dep	with	--time(late 5.54)--				--cost(late 5.54)--				-distance-	
node	time	time	line/mode	aux	wait	inv	cumul	aux	wait	inv	cumul	(km)	cumul
1195		01h32	a	2.00			2.00	3.00			8.54	.14	.14
201472	01h34	01h34	a	.14			2.14	.21			8.76	.01	.15
201473	01h34	01h35	10848 b		1.00	11.02	14.16		5.34	11.02	25.11	4.68	4.83
221744	01h46	01h46	a	2.29			16.45	3.43			28.54	.16	4.99
250540	01h48	01h50	1300v2 m		2.06	10.05	28.56		3.06	10.05	41.65	6.96	11.95
250534	02h00	02h00	a	2.14			30.70	3.21			44.87	.15	12.10
243008	02h02	02h02	a	1.29			31.99	1.93			46.79	.09	12.19
243045	02h04	02h04	a	1.14			33.13	1.71			48.51	.08	12.27
1090	02h05		total:	9.00	3.06	21.07	33.13	13.50	8.40	21.07	48.51		12.27

summary by mode:	b	1		6.54	11.02			10.88	11.02			4.68	
	m	1		2.06	10.05			3.06	10.05			6.96	
	a			9.00				13.50				.63	

	Kävely 1	Minimiodotus 1	Ajoaika 1	Vaihtokävely	Minimiodotus 2	Vaihto-odotus	Ajoaika 2	Kävely 2	Summa
Laaajasalo-keskusta (86+metro), malli	6,71	1	8,49	2,29	1	2,41	10,05	4,57	36,52
Laaajasalo-keskusta (86+metro), Reittiopas	8	0	9			4	10	4	35
Laaajasalo-keskusta (84+metro), malli	2,14	1	11,02	2,29	1	1,06	10,05	4,57	33,13
Laaajasalo-keskusta (84+metro), Reittiopas	3	0	15			4	10	4	36
Latokaski-Meilahti (195), malli	1,29	1	45,27	0	0	0	0	5,28	52,84
Latokaski-Meilahti (195), Reittiopas	2	0	52			0	0	4	58
Latokaski-Meilahti (42+213), malli	1,29	1	8,58	0	1	4,29	34,04	5,28	55,48
Latokaski-Meilahti (42+213), Reittiopas	2	0	9			7	28	4	50
Latokaski-Meilahti (160+42), malli	1,29	1	33,34	2,86	1	0,05	7,55	2,14	49,23
Latokaski-Meilahti (160+42), Reittiopas	2	0	33			4	10	1	50
Viikki-keskusta (68), malli	1,86	1	25,94	0	0	0	0	3,71	32,51
Viikki-keskusta (68), Reittiopas	4	0	29			0	0	4	37
Maunula-Hakaniemi (516), malli	4,71	1	14,39	0	0	0	0	1,7	21,8
Maunula-Hakaniemi (516), Reittiopas	6	0	20			0	0	0	26
Maunula-Hakaniemi (67), malli	4,71	1	13,86	0	0	0	0	3,71	23,28
Maunula-Hakaniemi (67), Reittiopas	6	0	18			0	0	4	28
Maunula-Hakaniemi (66A), malli	4,71	1	13,86	0	0	0	0	3,71	23,28
Maunula-Hakaniemi (66A), Reittiopas	6	0	20			0	0	4	30
Vuosaari-Meilahti (metro+41), malli	8,29	1	21,11	2,29	1	2,6	7,28	2,14	45,71
Vuosaari-Meilahti (metro+41), Reittiopas	8	0	21			6	8	1	44
Vuosaari-Meilahti (metro+45), malli	8,29	1	21,11	2,29	1	0,6	7,28	2,14	43,71
Vuosaari-Meilahti (metro+45), Reittiopas	8	0	21			4	11	1	45
Lauttasaari-Viikki (66A+68), malli	1,71	1	15,65	0	1	2,09	23,52	1,86	46,83
Lauttasaari-Viikki (66A+68), Reittiopas	3	1	21			4	29	3	61